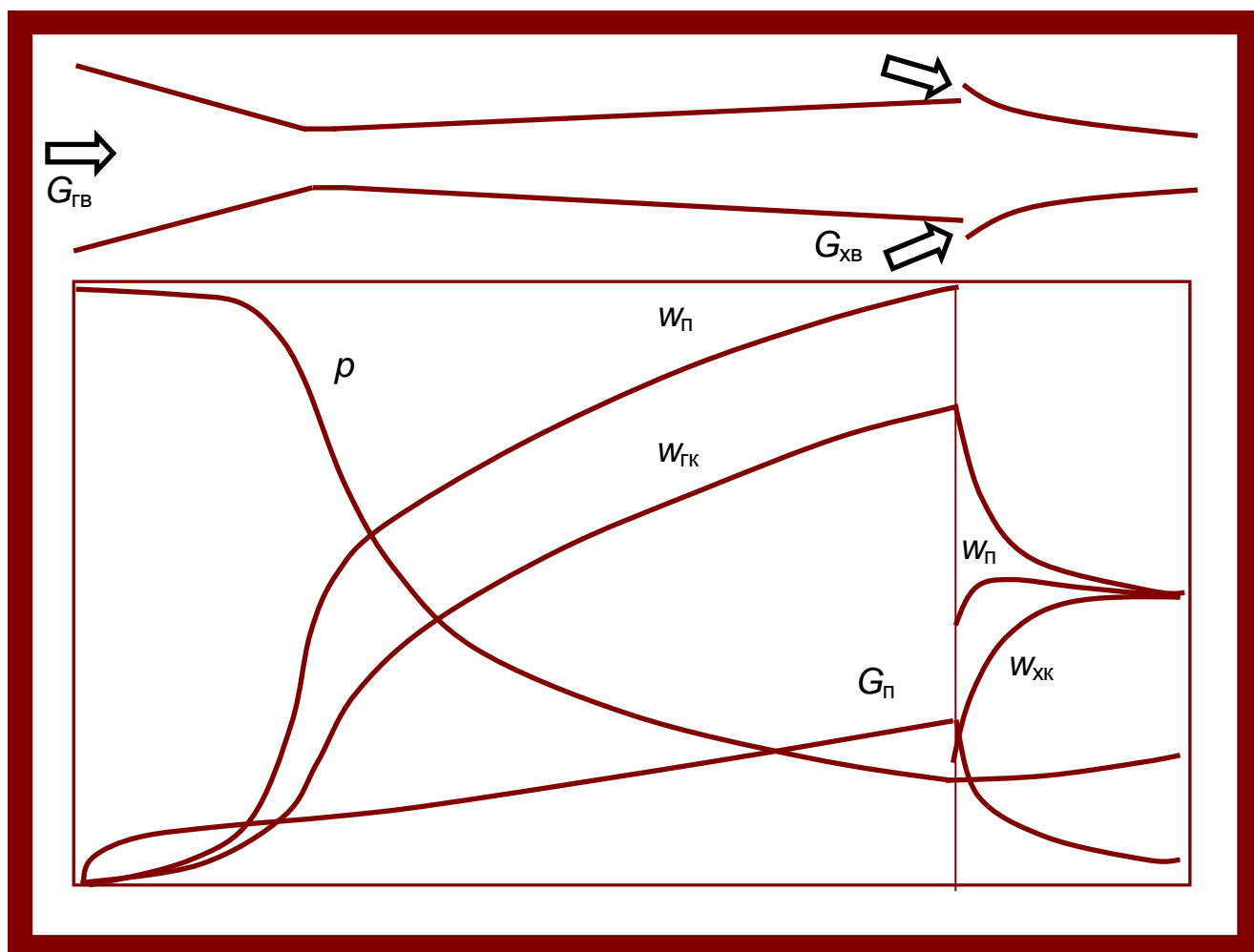


В.А. БАРИЛОВИЧ

ОСНОВЫ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ ПОТОКОВ И ИХ ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета

Федеральное агентство по образованию
—
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*ОБЩИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ ДИСЦИПЛИНЫ
В ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ*

В. А. БАРИЛОВИЧ

**Основы
термогазодинамики
двухфазных потоков и их
численное решение**

Учебное пособие

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2009

УДК 621.1.013

Основы термогазодинамики двухфазных потоков и их численное решение: Учебное пособие / В.А.Бариллович. СПб.: Изд. Политехнического университета, 2009, 425с.

Рассматривается течение двухфазных потоков, содержащих частицы, капли и пузырьки в каналах переменного сечения с прямой и криволинейной осью в абсолютном и относительном движении. Приводятся системы дифференциальных уравнений, решение которых реализовано в виде программ на языках Фортран, Бейсик и Паскаль, представлены результаты расчетов.

Данное учебное пособие по сравнению с первым и вторым (вышли в 2001 и 2005г. в издательстве "Нестор") содержит значительный собственный экспериментальный материал по исследованию процессов во вскипающем и двухфазном потоках в каналах энергетических устройств. Изучаются кавитационные явления при движении холодной капельной жидкости в канале переменного сечения. Значительное внимание уделяется кризисным явлениям в спутных и двухфазных потоках. Рассматриваются процессы в парогенерирующих каналах. Приводятся результаты опытов по конденсации паровой струи в спутном потоке холодной воды. Изложены результаты охлаждения двухфазным потоком высоконагретых поверхностей.

Учебное пособие расширяет раздел двухфазных течений в общем курсе гидрогазодинамики и служит дополнительным учебным материалом для самостоятельной и научной работы студентов бакалавриата и магистратуры энергомашиностроительного факультета.

Илл.79, Табл. 8, Библ. 57 назв.

Компьютерная графика в пособии и программы на языке "BASIC" выполнены доц. каф. ТОТ СПбГПУ Смирновым Ю.А., за что автор выражает ему глубокую благодарность.

Рецензенты: проф. кафедры "Теоретические основы теплотехники" СПбГПУ, д.т.н. Э.Л. Китанин;

Зав. кафедрой "Гидроаэродинамика" СПбГПУ проф., д-р физ.- мат. наук Е.М. Смирнов;

Главный научный сотр. ин-та проблем Машиноведения РАН, д.т.н. В.В. Фисенко;

Зав. лабораторией ОАО ЦКТИ д.т.н., проф. СПбГПУ Б.С.Фокин.

© Владимир Антонович Бариллович

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2009

Введение

Основные разделы курса гидрогазодинамики, читаемого студентам энергомашиностроительного факультета, посвящены изучению движения однородных потоков. Такие потоки реализуются в элементах проточных частей газовых турбин, компрессоров, гидравлических турбин и насосов. При этом, как правило, считают, что газовые среды подчиняются уравнению состояния идеального газа, а жидкость - несжимаема.

Такое упрощение в большинстве случаев оправдано и не приводит к заметным погрешностям в расчетах. Однако в ряде энергетических машин и устройств в процессе расширения потока вещество из однофазного переходит в двухфазное состояние, и расчет в предположении однородной среды становится неправомерным. Подобные явления имеют место в последних ступенях паровых турбин, когда в паре образуются капельки влаги; во входных устройствах насосов, где в зоне пониженного давления может возникать “холодное” кипение (из жидкости выделяются пузырьки газа и пара), приводящее к снижению энергетических и прочностных характеристик насосов. В холодильных машинах в процессе дросселирования жидкого хладагента происходит его вскипание. Аналогичные явления имеют место в турбинах, работающих на вскипающих потоках, где в процессе расширения вначале образуются пузырьки, а затем капли. В инжекторах происходит конденсация пара на каплях охлаждающей жидкости. В камере сгорания газотурбинной установки воздушный поток смешивается с каплями топлива. У ракетного двигателя, работающего на твердом топливе, в сопле движется газ, несущий твердые частицы. В струйных насосах ускорение жидкой фазы осуществляется газовым потоком. Подобные примеры из техники можно было бы продолжить.

Таким образом, будущему инженеру-энергомашиностроителю необходимо изучение раздела “Двухфазные потоки”.

Отметим, что успех решения любой научной задачи заключается в правильном понимании физического явления и создании на этой основе адекватных физической и математической моделей. В нашем случае необходимо ясно представлять, какой режим течения реализуется в тех или иных условиях.

Существует большое число режимов течения двухфазных потоков, которые зависят от соотношения массовых расходов компонентов, плотности, вязкости фаз и коэффициента поверхностного натяжения. К основным режимам можно отнести пузырьковый, пробковый, расслоенный, кольцевой, дисперсно-кольцевой и дисперсный, которые в первом приближении могут быть определены по диаграммам Бейкера [1], исследовавшего газожидкостные

смеси, и Б.К. Козлова [2], изучавшего структуру двухфазного потока в вертикальных трубах.

В методическом пособии приводятся уравнения сохранения применительно к гомогенным, дисперсно-кольцевым, дисперсным и пузырьковым потокам.

В первом разделе рассматривается движение двухфазного потока в каналах переменного сечения с прямой осью. Во втором – течение двухфазного потока в криволинейном канале, движение капель в абсолютной и относительной системах координат. В третьем – изложены основные положения математического описания пространственного гетерогенного потока. Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям сопел, инжекторов и турбины, работающих на перегретой воде. Рассматриваются процессы в спутных конденсирующихся потоках и охлаждение высоконагретых поверхностей двухфазными средами.

Численное решение систем обыкновенных дифференциальных уравнений в первом и втором разделах осуществляется методами Рунге-Кутты и Рунге-Кутта-Фельдберга.

В качестве тестового примера, позволяющего оценить точность расчета, рассматривается расширение идеального газа в сопле Лаваля.

Раздел I. Одномерный двухфазный поток

1. Течение идеального газа в сопле Лавалья

В разделе курса гидрогазодинамики “Одномерная газодинамика стационарных течений” студенты изучают течение идеального газа в каналах и соплах, выполняют расчет идеального сопла Лавалья с использованием газодинамических функций. Расчет ведется на основе интегральных соотношений, включающих уравнения сплошности, энергии и процесса для адиабатического канала, уравнения состояния идеального газа и уравнения, связывающего площадь поперечного сечения канала с продольной координатой:

$wF\rho = \text{const}$, $i^* = \text{const}$, $p/\rho^k = \text{const}$, $p/(\rho T) = R = \text{const}$, $F = \varphi(x)$,
 где $k = c_p/c_v$ - показатель изоэнтропы, $c_p - c_v = R$.

Чтобы решить эту задачу методом Рунге-Кутты, необходимо представить уравнения в дифференциальной форме. Для этого продифференцируем вышеприведенные уравнения, записав вместо уравнения процесса уравнение движения (Бернулли) для обратимого течения:

$$\begin{cases} \frac{dw}{w} + \frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dF}{F} \\ \frac{w^2}{c_p T} \frac{dw}{w} + \frac{dT}{T} = 0 \\ \frac{dp}{p} - \frac{dT}{T} - \frac{d\rho}{\rho} = 0 \\ \frac{\rho w^2}{p} \frac{dw}{w} + \frac{dp}{p} = 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Главный определитель такой системы уравнений имеет вид

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{w^2}{c_p T} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ \frac{\rho w^2}{p} & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

Раскрывая (1.2), найдем, что

$$\Delta = -\left(1 + \frac{w^2}{c_p T} - \frac{\rho w^2}{p}\right) = -\left(1 + \frac{(k-1)w^2}{a^2} - \frac{k w^2}{a^2}\right) = M^2 - 1, \quad (1.3)$$

где $a = \sqrt{kRT}$ - термодинамическая скорость звука в идеальном газе; $M=w/a$ - критерий Маха.

Разрешив (1.1) относительно dp/p , получим

$$\frac{dp}{p} = -\frac{kM^2}{(M^2 - 1)} \frac{dF}{F}. \quad (1.4)$$

Отметим, что выражение (1.4) можно получить, используя формулу Крамера [3]

$\frac{dp}{p} = \frac{\Delta_p}{\Delta}$, где Δ_p - определитель, получающийся из Δ заменой столбца, составленного из коэффициентов при dp/p , столбцом, составленным из свободных членов. Для нашего случая имеем:

$$\Delta_p = \begin{vmatrix} 1 & -\frac{dF}{F} & 0 & 1 \\ \frac{w^2}{c_p T} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ \frac{\rho w^2}{p} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} = -\frac{\rho w^2}{p} \frac{dF}{F} = -\frac{k w^2}{kRT} \frac{dF}{F} = -\frac{k w^2}{a^2} \frac{dF}{F} = -kM^2 \frac{dF}{F}.$$

Тогда

$$\frac{dp}{p} = \frac{\Delta_p}{\Delta} = -\frac{kM^2}{(M^2 - 1)} \frac{dF}{F}, \quad \text{или} \quad \frac{dp}{dx} = -\frac{kM^2}{(M^2 - 1)} \frac{p}{F} \frac{dF}{dx}. \quad (1.5)$$

Остальные производные из (1.1) перепишем в виде

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho w} \frac{dp}{dx}, \quad (1.6)$$

$$\frac{dT}{dx} = -(k-1)M^2 \frac{T}{w} \frac{dw}{dx}, \quad (1.7)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\rho}{p} \frac{dp}{dx} - \frac{\rho}{T} \frac{dT}{dx}. \quad (1.8)$$

Уравнения (1.6)-(1.8) можно также преобразовать к виду:

$$\frac{dw}{dx} = \frac{w}{(M^2 - 1)F} \frac{dF}{dx} \quad , \quad (1.9)$$

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{(k-1)M^2}{(M^2 - 1)F} T \frac{dF}{dx} \quad , \quad (1.10)$$

$$\frac{d\rho}{dx} = -\frac{M^2}{(M^2 - 1)F} \rho \frac{dF}{dx} \quad . \quad (1.11)$$

Используя понятие логарифмической производной, перепишем систему уравнений в иной форме:

$$\frac{d \ln p}{dx} = -\frac{kM^2}{(M^2 - 1)} \frac{d \ln F}{dx} \quad , \quad (1.12)$$

$$\frac{d \ln w}{dx} = \frac{1}{(M^2 - 1)} \frac{d \ln F}{dx} \quad , \quad (1.13)$$

$$\frac{d \ln T}{dx} = -\frac{(k-1)M^2}{(M^2 - 1)} \frac{d \ln F}{dx} \quad , \quad (1.14)$$

$$\frac{d \ln \rho}{dx} = -\frac{M^2}{(M^2 - 1)} \frac{d \ln F}{dx} \quad . \quad (1.15)$$

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений позволяет при заданной функции $F=f(x)$ определить производные dp/dx , dw/dx , dT/dx , $d\rho/dx$ и, используя численный метод, найти распределение p, w, T и ρ вдоль координаты x при заданных граничных условиях : $x=0$, $p=p_o^*$, $w=w_o$, $T=T_o^*$, $\rho=\rho_o^*$ (задача Коши).

При изэнтропийном критическом и сверхкритическом режимах истечения в минимальном сечении канала $\rho w = (\rho w)_{\max}$, $M=1$, а $dF/dx=0$, т.е. имеет место неопределенность, так как $dp/dx=-0/0$, которую можно раскрыть по правилу Лопиталю. Для этого перепишем уравнение (1.12) в виде

$$\frac{d \ln p}{dx} = -\frac{k \frac{1}{F} \frac{dF}{dx}}{1 - \left(\frac{a}{w}\right)^2} \quad (1.16)$$

и возьмем отдельно производные от числителя и знаменателя. Для числителя будем иметь:

$$-k \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right) = -k \left(\frac{1}{F} \frac{d^2 F}{dx^2} + \frac{dF}{F} \left(-\frac{1}{F^2} \frac{dF}{dx} \right) \right),$$

но в критическом сечении $dF/dx=0$, тогда числитель примет вид

$$-\frac{k}{F} \frac{d^2 F}{dx^2} . \quad (1.17)$$

Для знаменателя напишем окончательное выражение

$$-\frac{d}{dx} \left(\frac{a^2}{w^2} \right) = - \left(\frac{k+1}{k} \right) \frac{d \ln p}{dx} . \quad (1.18)$$

Здесь мы не приводим вывод (1.18), ввиду его громоздкости, но для тех, кто хотел бы его выполнить, подскажем ряд положений. Так, из уравнения Бернулли, записанного для изоэнтропийного процесса $w dw = -dp/\rho$, можно получить

$$\frac{d \ln w}{dx} = - \frac{vp}{w^2} \frac{d \ln p}{dx} = - \frac{kp v}{kw^2} \frac{d \ln p}{dx} = - \frac{a^2}{kw^2} \frac{d \ln p}{dx} .$$

Дифференцируя уравнение состояния $v=RT/p$, найдем, что

$$\frac{d \ln v}{dx} = \frac{d \ln T}{dx} - \frac{d \ln p}{dx} .$$

Используя (1.7), можно написать:

$$\frac{d \ln T}{dx} = -(k-1) \frac{w^2}{a^2} \frac{d \ln w}{dx} .$$

Кроме того, в критическом сечении $w=a$ и т.д. Подставляя (1.17) и (1.18) в (1.16), получим

$$\frac{d \ln p}{dx} = \pm k \sqrt{\frac{d^2 F / dx^2}{(k+1)F}} , \quad (1.19)$$

$$\text{или} \quad \frac{dp}{dx} = \pm k \sqrt{\frac{p^2}{(k+1)F} \frac{d^2 F}{dx^2}} . \quad (1.20)$$

Уравнение (1.20) определяет наклон кривых давления в критической точке. Видно, что имеет место двойственность (\pm), то есть вниз по потоку от критического сечения возможно развитие процесса по одному из двух направлений: с ростом давления ($dp/dx > 0$) и с уменьшением ($dp/dx < 0$), когда поток становится сверхзвуковым. Численные эксперименты показывают, что при решении прямой задачи, даже в случае, когда расход равен критическому $\dot{G}_{\text{кр}} = F_{\Gamma} (\rho w)_{\text{кр}}$, процесс протекает при $dp/dx > 0$. Для того чтобы процесс пошел по нижней ветке кривой ($dp/dx < 0$), достаточно незначительно увеличить расход сверх критического. Для рассматриваемого случая ($p_0 = 6 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 426$ К, $k = 1,4$, $D_0 = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $D_{\Gamma} = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $D_{\text{ср}} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $x_{\text{к}} = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $x_{\text{мин}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $x_D = 0,105$ м, где D и x – диаметр и протяженность конвергентной,

цилиндрической и дивергентной частей сопла Лавалья) отношение $\dot{G}/\dot{G}_{\text{КР}}$ равнялось 1,007939. Получено оно следующим образом: рассчитывается критический расход $\dot{G}_{\text{КР}} = F_{\Gamma}(\rho w)_{\text{КР}}$, затем скорость газа в нулевом сечении при критическом расходе $w_0 = \dot{G}_{\text{КР}} / F_0 / \rho_0$, далее эту скорость увеличивают до тех пор, пока не выполнится условие $dp/dx < 0$. В данном примере скорость была увеличена с 17,034 до 17,200 м/с. Таким образом, решение прямой задачи связано с определенными трудностями, но они, как видим, преодолимы.

Решение задачи при таком подходе не является строгим и возможно лишь тогда, когда особая точка находится внутри шага интегрирования. Следовательно, в этом случае невозможно определить величину минимального сечения канала и критический расход с высокой точностью. Изменение шага интегрирования может привести к неустойчивости решения в виде осцилляций (всплесков) в области горла. Отметим, что при решении прямых задач с целью снижения трудоемкости вычислительного характера необходимо вначале реализовать обратную задачу (см. ниже), что позволит в первом приближении определить характерные поперечные сечения канала.

Если задан (известен) закон распределения статического давления вдоль сопла $p=f(x)$ (обратная задача), то вышеупомянутая проблема не возникает.

Опытное исследование сопел Лавалья, работающих на вскипающей воде, показывает, что в качестве такой функции можно использовать зависимость

$$p = \frac{P_0}{\left(\frac{p_0}{p_{cp}} - 1\right)\left(\frac{x}{l}\right)^n + 1}, \quad (1.21)$$

где l - длина сопла; p_{cp} - статическое давление на выходном срезе сопла, $n=2\dots 6$. В этом случае система дифференциальных уравнений при $n = 2$ примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = -\frac{2p_0(p_0/p_{cp} - 1)x}{l^2 \left[\left(p_0/p_{cp} - 1\right)\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1 \right]^2}, \\ \frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho w} \frac{dp}{dx}, \\ \frac{dT}{dx} = -\frac{(k-1)\mu w}{k R_0} \frac{dw}{dx}, \\ \frac{d\rho}{dx} = \rho \left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dx} - \frac{1}{T} \frac{dT}{dx} \right). \end{cases} \quad (1.22)$$

Задаваясь расходом \dot{G} и решая систему уравнений (1.22), находим текущие значения скорости, плотности и температуры.

Площадь поперечного сечения сопла и диаметр определим по формулам:

$$F = \frac{\dot{G}}{\rho w} , \quad (1.23)$$

$$D = \sqrt{\frac{4F}{\pi}} . \quad (1.24)$$

Численное решение системы уравнений (1.22)-(1.24) реализовано в программе “LAV1A” (см. приложение №1).

Так как точность расчета, выполненного численным методом, зависит от величины выбранного шага по продольной координате Δx , то можно найти такой шаг, который обеспечит расчет с заданной относительной погрешностью

$$\varepsilon = \frac{w_s - w}{w_s} \cdot 100 , \quad (1.25)$$

где $w_s = \sqrt{\frac{2k}{(k-1)} \frac{R_0}{\mu} T_1^* \left[1 - \left[\frac{p}{p_0^*} \right]^{\frac{k-1}{k}} \right]}$ - изоэнтروпийная скорость.

Для выполненного методом Рунге-Кутты расчета ($\dot{G}=0,3$ кг/с; $l=0,15$ м; $w_0=30$ м/с; $T_0=426$ К; $p_0=0,6$ МПа; $p_{cp}=0,1$ МПа; $k=1,4$; см. программу “LAV1A”) при шаге $\Delta x=0,3 \cdot 10^{-3}$ м относительная погрешность в сечении $x=0,3 \cdot 10^{-3}$ м составила $\varepsilon = -1,74$ %, а на выходе сопла $-3,51 \cdot 10^{-2}$ %, то есть $(w_s-w)=-0,206$ м/с, что свидетельствует о высокой точности расчета.

Проверка достоверности численного расчета проводилась путем сравнения с расчетом сопла с помощью интегральных соотношений. Проведенное тестирование подтверждает корректность метода, что позволяет выполнять численные расчеты течения в каналах, работающих на двухфазных потоках, когда отсутствуют аналитические решения.

Рассмотрим течение идеального газа при наличии сил трения. В этом случае уравнение движения примет вид:

$$\dot{G}dw = -Fdp - \tau_w \pi D dx , \quad (1.26)$$

где $\tau_w = c_f \rho w^2 / 2$ - касательное напряжение на стенке канала. Разрешая (1.26) относительно dw/dx , получим

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D} . \quad (1.27)$$

Теперь система уравнений для прямой задачи запишется в виде:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = \frac{kM^2 p}{(M^2 - 1)} \left[\frac{2c_f}{D} (1 + (k-1)M^2) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right] , \\ \frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D} , \\ \frac{dT}{dx} = -\frac{(k-1) M^2 T}{(M^2 - 1)} \frac{dF}{dx} , \\ \frac{d\rho}{dx} = \frac{M^2}{(M^2 - 1)} \frac{\rho}{F} \frac{dF}{dx} . \end{cases} \quad (1.28)$$

Численное решение системы (1.28) при $F=f(x)$ приведено в программе “LAVIT”(см. приложение №1).

2. Модель гомогенного потока

Экспериментальные исследования показывают, что при течении в каналах вскипающих потоков (когда в канал поступает жидкость по своим свойствам близкая к состоянию насыщения) или высоковлажных потоков при высоких начальных давлениях ($p_0^* > 3$ МПа) и значительных градиентах давления вдоль канала, можно в первом приближении использовать для расчетов теорию гомогенного потока [4], когда текущую среду наделяют свойствами “тумана”, где отсутствует раздел между фазами, а сами фазы находятся в механическом итермическом равновесии. Возникает необходимость в исследовании поведения таких потоков в каналах переменного сечения.

Туманообразная изотропная среда может рассматриваться как континуум и характеризоваться обычными макровеличинами - термодинамическими параметрами (p, T, v, i, s) . В такой среде внешнее воздействие не нарушает теплового и механического равновесия между фазами. Считают, что скорость звука в такой бесконечной изотропной среде определяется по формуле Лапласа

$$a_s = \sqrt{(\partial p / \partial \rho)_s} . \quad (2.1)$$

Найдем выражение для термодинамической скорости звука в такой среде. Запишем первый закон термодинамики для обратимого процесса

$$dq = du + pdv , \quad (2.2)$$

но $du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$, а $c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$, тогда $dq = c_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] dv$.

Покажем, что $\left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$.

Из объединенного закона термодинамики для обратимого процесса, записанного в виде

$Tds = c_v dT + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] dv$ следует $ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] dv$. Поскольку

энтропия, как функция состояния, является функцией двух переменных T и v , то накрест взятые производные должны быть равны:

$$\frac{\partial}{\partial v} \left[\frac{c_v}{T} \right]_T = \frac{\partial}{\partial T} \left\{ \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] \right\}_v$$

Взяв производные от левой и правой частей, получим

$$\frac{1}{T} \left[\frac{\partial c_v}{\partial v} \right]_T = -\frac{1}{T^2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] + \frac{1}{T} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v + \frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} \right],$$

но $\frac{\partial^2 u}{\partial T \partial v} = \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T$, тогда $p + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$.

Отметим, что выражение $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v - p$ называют калорическим

уравнением состояния реального газа. Для идеального газа $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$, и имеем

тождество $\frac{RT}{v} - p = 0$, так как $\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R}{v}$.

Таким образом, первый закон термодинамики для обратимого процесса может быть записан в виде

$$dq = c_v dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv. \quad (2.4)$$

Теперь для политропического процесса можно написать

$$(c_v - c_n) dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv = 0, \quad (2.5)$$

где $dq = c_n dT$; c_n - удельная теплоемкость политропического процесса.

Так как $T = \varphi(p, v)$, то

$$dT = \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p dv + \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v dp . \quad (2.6)$$

Введем понятие характеристической скорости звука [4]

$$a^2 = dp/d\rho . \quad (2.7)$$

С учетом (2.5) и (2.6) преобразуем (2.7) к виду

$$a^2 = \frac{1}{\rho} \left[\frac{T}{(c_v - c_n)} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \right] . \quad (2.8)$$

Используя известную связь между производными

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_p \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = -1, \quad (2.9)$$

уравнение (2.8) представим в форме

$$a^2 = \frac{1}{\rho^2} \left[\frac{T}{(c_v - c_n)} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v^2 - \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \right] . \quad (2.10)$$

Для однокомпонентной двухфазной области $p=f(T)$, следовательно $\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = 0$, а

$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{dp}{dT}$, тогда

$$a^2 = \frac{1}{\rho^2} \frac{T}{(c_v - c_n)} \left(\frac{dp}{dT} \right)^2 . \quad (2.11)$$

Если вещество в звуковой волне не обменивается теплотой с окружающей средой, то $c_n=0$, а выражение (2.11) переходит в формулу Кёртиса

$$a_s^2 = \frac{1}{\rho^2} \frac{T}{c_v} \left(\frac{dp}{dT} \right)^2 . \quad (2.12)$$

Разделив (2.11) на (2.12), получим связь между характеристической и термодинамической скоростями звука

$$a^2 = a_s^2 \left(1 - \frac{c_n}{c_v} \right)^{-1} . \quad (2.13)$$

Таким образом, в потоках с интенсивным подводом и отводом теплоты кризисная ситуация возникает при $w=a$, а в адиабатических потоках при $w=a_s$. С учетом уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T(v'' - v')} , \quad (2.14)$$

перепишем (2.12) в более удобной для расчетов форме

$$a_s^2 = \frac{1}{c_v T} \left(\frac{rv}{v'' - v'} \right)^2 , \quad (2.15)$$

где $c_v = (1 - x_v)c'_v + x_v c''_v$ - удельная изохорная теплоемкость влажного пара; c'_v и c''_v - удельные теплоемкости насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара со стороны двухфазной области [5]; $v = (1 - x_v)v' + x_v v''$ - удельный объем влажного пара. Из (2.15) видим, что термодинамическая скорость звука в гомогенном потоке зависит не только от температуры, как в идеальном газе, но и от степени сухости.

Найдем связь между термодинамической скоростью звука и показателем изоэнтропы во влажном паре.

По определению

$$k = \left(\frac{\partial i}{\partial u} \right)_s = -\frac{v}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s , \quad \text{но} \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = -\frac{T}{c_v} \left(\frac{dp}{dT} \right)^2 , \quad \text{тогда}$$

$$k = \frac{v}{p} \frac{T}{c_v} \left(\frac{dp}{dT} \right)^2 . \quad (2.16)$$

Сравнивая (2.12) и (2.16), находим, что

$$a_s^2 = k \frac{p}{\rho} = k p v . \quad (2.17)$$

Вместо (2.16) можно написать

$$k = \frac{v}{c_v p T} \left(\frac{r}{v'' - v'} \right)^2 . \quad (2.18)$$

Из формул видно, что в двухфазной области показатель изоэнтропы является переменной величиной. Напомним, что для идеального газа $k = (\tilde{a}/\tilde{a}i)_s = c_p/c_v$.

Так как в современном энергомашиностроении имеют место, как правило, критические и сверхкритические режимы течения, то необходимо установить условия существования этих режимов. Если считать, что кризис течения характеризуется независимостью плотности тока от давления, то можно написать

$$\left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial p} \right]_s = 0 \quad (2.19)$$

Раскрывая (2.19) с учетом уравнения Бернулли $w dw = -\frac{dp}{\rho}$, получим

$$\left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial p} \right]_s = \frac{M^2 - 1}{w} = 0 \quad (2.20)$$

Таким образом, в гомогенном изоэнтропийном потоке, как и в потоке идеального газа, кризис течения имеет место при $M=1$. Здесь также для получения сверхзвуковых потоков необходимо применять каналы, имеющие суживающуюся и расширяющуюся части

$$(M^2 - 1) \frac{dw}{w} = \frac{dF}{F} \quad (2.21)$$

Кризис течения имеет место в наименьшем сечении канала, то есть при $dF=0$, в этом сечении поток имеет наибольшую плотность тока $\rho w = (\rho w)_{\max}$.

Рассмотрим изоэнтропийное течение одномерного гомогенного потока в канале переменного сечения. Для его описания необходимо иметь четыре уравнения: сплошности, движения, энергии и Клапейрона-Клаузиуса, устанавливающего связь между температурой и давлением насыщения.

$$\left\{ \begin{array}{l} d(wF/v) = 0, \\ wdw + vdp = 0, \\ di + wdw = 0, \\ dp - \frac{r}{T(v'' - v')} dT = 0, \end{array} \right. \quad (2.22)$$

где $i=f(p,v)$.

Перепишем (2.22) в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw}{w} - \frac{dv}{v} = -\frac{dF}{F}, \\ w^2 \frac{dw}{w} + pv \frac{dp}{p} = 0, \\ w^2 \frac{dw}{w} + p \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v \frac{dp}{p} + v \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dv}{v} = 0, \\ \frac{dp}{p} - \frac{r}{(v'' - v')p} \frac{dT}{T} = 0 \end{array} \right. \quad (2.23)$$

Выразим частные производные $\left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p$ через термодинамические параметры. Запишем объединенный закон термодинамики для обратимого процесса в виде $Tds = di - vdp$. При $p = \text{const}$ $T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_p = \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p$. Воспользуемся уравнениями Максвелла, устанавливающими связь между частными производными термодинамических функций в различных процессах

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s} \right)_p, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_T, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial s} \right)_T = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v.$$

Для нашего случая $\left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_p = \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_s$, тогда

$$\left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_p = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_s = T \frac{dp}{dT} = \frac{r}{v'' - v'}.$$

Дифференцируя уравнение $Tds = di - vdp$ по давлению при $v = \text{const}$, получим

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v - v, \quad \text{но} \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s, \quad \text{тогда} \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s + v. \quad \text{Используя}$$

уравнение $Tds = c_v dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$ при $s = \text{const}$, будем иметь $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s = -\frac{c_v}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v$, с

$$\text{учетом чего можно написать} \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v + v = c_v \frac{dT}{dp} + v = \frac{c_v T}{r} (v'' - v') + v.$$

Составим главный определитель системы (2.23)

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ w^2 & pv & 0 & 0 \\ w^2 & p\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v & 0 & v\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p \\ 0 & 1 & -\frac{r}{(v''-v')p} & 0 \end{vmatrix} = -\frac{r}{(v''-v')} \left[v^2 \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p - w^2 \left(\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v \right) \right] =$$

$$= -\frac{r \left(\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v \right)}{(v''-v')} \left[\frac{v^2 \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p}{\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v} - w^2 \right] = -\frac{r \left(\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v \right)}{(v''-v')} (a_s^2 - w^2) = (M^2 - 1) \left(\frac{vr}{v''-v'} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$\text{или } \Delta = (M^2 - 1) c_v T a_s^2, \quad \text{где } a_s^2 = \frac{v^2 \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p}{\left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v} = \frac{1}{c_v T} \left(\frac{vr}{v''-v'} \right)^2.$$

Выполнив операции по нахождению определителей искоемых величин, получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_w = \frac{rv^2}{(v''-v')} \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p \frac{dF}{F}, \\ \Delta_p = -\frac{rvw^2}{(v''-v')p} \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p \frac{dF}{F}, \\ \Delta_T = -vw^2 \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial v}\right)_p \frac{dF}{F}, \\ \Delta_v = \frac{r}{(v''-v')p} \left[w^2 p \left(\frac{\partial \tilde{a}}{\partial \varphi}\right)_v - v \right] \frac{dF}{F}. \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Используя формулу Крамера, найдем производные для решения прямой задачи

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dw}{dx} = \frac{\Delta_w}{\Delta} = \frac{1}{(M^2-1)F} \frac{w}{dx} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta_p}{\Delta} = -\frac{1}{(M^2-1)vF} \frac{w^2}{dx} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dT}{dx} = \frac{\Delta_T}{\Delta} = -\frac{(v''-v')T w^2}{(M^2-1)rvF} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dv}{dx} = \frac{\Delta_v}{\Delta} = \frac{M^2 v}{(M^2-1)F} \frac{dF}{dx}. \end{array} \right. \quad (2.26)$$

Для обратной задачи, когда, например,

$$p = \frac{p_0}{\left(\frac{p_0}{p_{cp}} - 1\right)\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1},$$

система уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp}{dx} = -\frac{2p_0(p_0/p_{cp} - 1)x}{l^2 \left[\left(\frac{p_0}{p_{cp}} - 1\right)\left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1 \right]^2}, \\ \frac{dF}{dx} = -\left(M^2 - 1\right)\frac{vF}{w^2} \frac{dp}{dx}, \\ \frac{dw}{dx} = \frac{1}{\left(M^2 - 1\right)F} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dT}{dx} = -\frac{T(v'' - v')w^2}{\left(M^2 - 1\right)vF} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dv}{dx} = \frac{M^2}{\left(M^2 - 1\right)F} \frac{dF}{dx}. \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Численное решение системы уравнений (2.26) реализовано в программах GM1A и GM4, а системы (2.27) - GM2 и GM3 (см. приложение №2).

Во всех программах начальная степень сухости пара $x_v = \dot{G}_v / (\dot{G}_v + \dot{G}_w)$ может изменяться от 0,05 до 1, что делает их универсальными, так как это позволяет выполнять расчеты равновесного расширения высоковлажного пара и сухого насыщенного пара.

В программах GM1A и GM2 физические свойства воды и пара на линии насыщения представлены оператор-функциями. В программах GM3 и GM4 используются подпрограммы "SPLINE" и "SEVAL". Первая позволяет найти коэффициенты полинома, аппроксимирующего функцию, вторая - значение искомой величины в заданной точке. В программах GM1A и GM2 необходимо знать или получить аналитические зависимости свойств вещества от температуры, например, $v' = f(T)$, $v'' = f_1(T)$, $r = \varphi(T)$, $c_v' = \varphi_1(T)$, $c_v'' = \varphi_2(T)$, и т.д. В GM3 и GM4 достаточно лишь занести табличные значения физических величин в файл данных, что является несомненным преимуществом этих программ. Однако число строк в программе при этом увеличивается.

В реальных системах поток кроме геометрического воздействия $L_1 = (1/F)(dF/dx)$ испытывает силовое воздействие, обусловленное трением $L_2 = -2c_f w^2/D$ и может подвергаться тепловому $L_3 = -4q_w v / (wD) = -4\alpha v(T - T_w) / (wD)$ и химическому воздействию L_4 . В дальнейшем будем считать, что $L_4 = 0$.

В этом случае уравнения движения и энергии принимают вид:

$$\dot{G}dw = -Fdp - \tau_w \pi D dx,$$

$$\dot{G}di^* = q_w \pi D dx, \quad \text{где } i = f(v, p).$$

После преобразования этих уравнений будем иметь:

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D},$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p \frac{dv}{dx} + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_v \frac{dp}{dx} + w \frac{dw}{dx} = \frac{4q_w v}{wD}.$$

Теперь вместе с уравнениями сплошности и Клапейрона-Клаузиуса система уравнений примет вид:

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D},$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p \frac{dv}{dx} + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_v \frac{dp}{dx} + w \frac{dw}{dx} = \frac{4q_w v}{wD},$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v}{w} \frac{dw}{dx} - \frac{v}{F} \frac{dF}{dx},$$

$$\frac{dT}{dx} = (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx}.$$

Разрешая систему относительно dp/dx , получим

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= \frac{1}{\left[\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_v - \frac{v^2}{w^2} \left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p - v\right]} \left[\frac{4q_w v}{wD} + \frac{2c_f}{D} \left(v \left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p + w^2 \right) - \frac{v}{F} \left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p \frac{dF}{dx} \right] \\ &\frac{dw}{dx} = -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \\ &\frac{dv}{dx} = \frac{v}{w} \frac{dw}{dx} + \frac{v}{F} \frac{dF}{dx}, \\ &\frac{dT}{dx} = (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx}, \end{aligned} \right. \quad (2.28)$$

где $c_f = f(\text{Re})$; $\text{Re} = wD\rho/\mu$; $\mu = \frac{\mu''\mu'}{x_v\mu' + (1-x_v)\mu''}$, $\rho = \frac{1}{v}$, $v = (1-x_v)v' + x_v v''$, где x_v – степень сухости пара.

Подставляя в dp/dx выражения частных производных $\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_v$, $\left(\frac{\partial i}{\partial v}\right)_p$ найдем,

что

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\frac{4q_w v}{wD} + \frac{rv}{(v'' - v')} \left[\frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{vr} (v'' - v') \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right]}{\frac{rv^2}{(v'' - v')w^2} \left[\frac{c_v T (v'' - v')^2}{(vr)^2} - 1 \right]}. \quad (2.29)$$

Используя формулу для термодинамической скорости звука (2.15), перепишем (2.29) в виде

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\frac{4q_w v}{wD} + a_s \sqrt{c_v T} \left[\frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right]}{\frac{va_s \sqrt{c_v T}}{w^2} (M^2 - 1)}. \quad (2.30)$$

Для адиабатического канала ($q_w=0$) получим

$$\frac{dp}{dx} = \frac{w^2}{v(M^2 - 1)} \left[\frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right]. \quad (2.31)$$

При изэнтропийном течении ($c_f=0$) гомогенного потока в канале будем иметь

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{w^2}{v(M^2 - 1)F} \frac{dF}{dx}, \text{ но } a_s^2 = kp v, \text{ откуда } v = \frac{a_s^2}{kp}, \text{ тогда}$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{M^2 kp}{(M^2 - 1)F} \frac{dF}{dx},$$

где k определяется по формуле (2.18).

На основании системы (2.28) была составлена программа GM1QT (приложение №2), позволяющая оценить роль различных воздействий на гомогенный пароводяной поток.

Для адиабатического цилиндрического канала $\frac{dF}{dx} = 0$ и формула (2.31)

принимает вид

$$\frac{dp}{dx} = \frac{w^2}{v(M^2 - 1)} \frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right). \quad (2.32)$$

Используя уравнение (2.32) совместно с уравнениями

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \quad \frac{dv}{dx} = \frac{v}{w} \frac{dw}{dx}, \quad \frac{dT}{dx} = (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx},$$

можно определить при заданных диаметре канала и расходе длину цилиндрической трубы, которая пропустит заданный критический (максимальный) расход и величину критического давления на выходном срезе трубы (см. рис.2.1и программу GM1_CILS в приложении №2). Решение данной задачи позволяет дать ответ и на один из важнейших вопросов – каким будет критический расход при заданных начальных параметрах и относительной длине трубы $\bar{L} = L/D$. Знание характеристик потока на срезе разорвавшейся трубы позволяет создавать рациональные аварийные системы в тепловой и атомной энергетике.

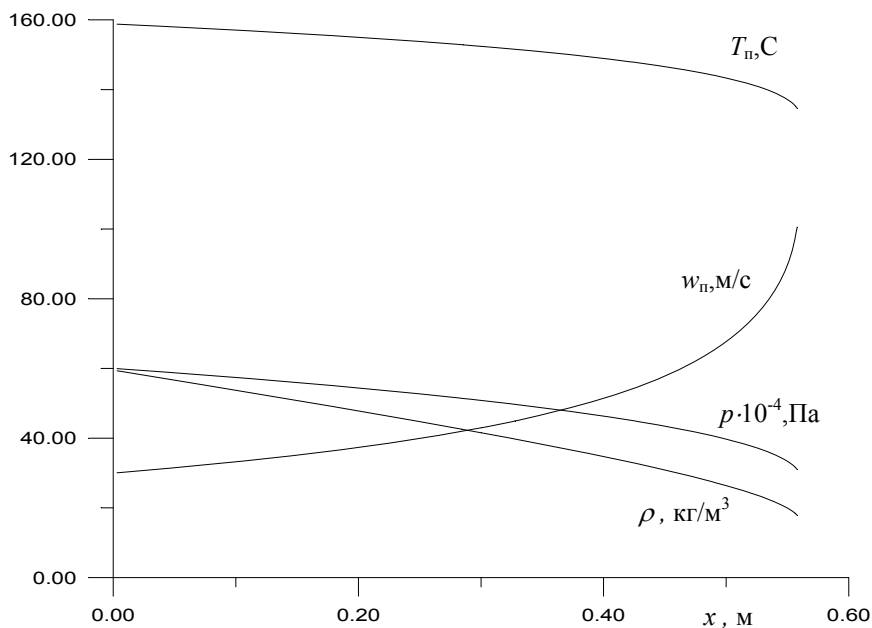


Рис. 2.1

3. Дисперсно-кольцевое течение

3.1. Уравнения сохранения потока массы

Рассмотрим движение двухфазного одномерного однокомпонентного потока в адиабатическом канале с непроницаемыми стенками. Выделим в канале неподвижный элемент объемом $dV = F dx$ и составим уравнение баланса элементарных потоков масс (метод Эйлера) для дисперсно-кольцевого режима течения, который при отсутствии пленки переходит в дисперсный.

Рассмотрим двухфазный поток с испаряющимися каплями ($T_k > T_n$). Локальное изменение массы капель в элементарном объеме в единицу времени обусловлено изменением потока капель через его границы, уносом жидкости с поверхности пленки ($d\dot{E}_{yn}$), выпадением (осаждением) капель в пленку ($d\dot{D}_{oc}$) и испарением горячих капель ($d\dot{G}_{к-п}$), то есть

$$\frac{\partial \dot{G}_k}{\partial \tau} = -\frac{\partial \dot{G}_k}{\partial x} dx + \frac{\partial}{\partial x} [\dot{E}_{yn} - \dot{D}_{oc} - \dot{G}_{к-п}] dx. \quad (3.1)$$

Для стационарного потока будем иметь

$$d\dot{G}_k = d\dot{E}_{yn} - d\dot{D}_{oc} - d\dot{G}_{к-п} \quad [\text{кг/с}].$$

Уравнения сохранения масс парового потока и испаряющейся пленки ($T_{пл} > T_n$) будут иметь вид:

$$d\dot{G}_n = d\dot{G}_{к-п} + j_{пл-п} dS_{пл}, \quad (3.2)$$

$$d\dot{G}_{\text{Пл}} = d\dot{D}_{\text{OC}} - d\dot{E}_{\text{Ун}} - j_{\text{Пл-П}} dS_{\text{Пл}} \quad (3.3)$$

где $j_{\text{Пл-П}}$ - плотность потока массы пара, уносимого с единичной поверхности пленки, кг/(м²с); $dS_{\text{Пл}}$ - элементарная поверхность пленки.

Складывая (3.1), (3.2) и (3.3), получим уравнение сохранения массы для всего потока

$$d\dot{G}_{\text{К}} + d\dot{G}_{\text{П}} + d\dot{G}_{\text{Пл}} = 0. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) можно записать в виде

$$d(w_{\text{К}} f_{\text{К}} \rho_{\text{К}} + w_{\text{П}} f_{\text{П}} \rho_{\text{П}} + w_{\text{Пл}} f_{\text{Пл}} \rho_{\text{Пл}}) = 0, \quad (3.5)$$

интегрируя (3.5), получим

$$w_{\text{К}} f_{\text{К}} \rho_{\text{К}} + w_{\text{П}} f_{\text{П}} \rho_{\text{П}} + w_{\text{Пл}} f_{\text{Пл}} \rho_{\text{Пл}} = \text{const}. \quad (3.6)$$

Площадь поперечного сечения канала можно представить в виде суммы площадей, занимаемых фазами

$$F = f_{\text{К}} + f_{\text{П}} + f_{\text{Пл}}. \quad (3.7)$$

В маловлажных парок капельных потоках, движущихся с большой скоростью в адиабатических каналах, в первом приближении можно считать, что толщина пленки мала и ею можно пренебречь, то есть $f_{\text{Пл}} = 0$. Вопросы уноса и выпадения капель в двухфазном потоке являются сложной научной задачей, которая решена лишь частично в экспериментальном плане для цилиндрических каналов при определенных режимных параметрах [6]. В случае, когда $d\dot{D}_{\text{м.н.}} = d\dot{E}_{\text{Ун}} = 0$ уравнение (3.1) примет вид

$$d\dot{G}_{\text{К}} = -d\dot{G}_{\text{К-П}}. \quad (3.8)$$

Так как изменение (уменьшение) элементарного потока массы капель $d\dot{G}_{\text{К}}$ вызвано испарением капель ($T_{\text{К}} > T_{\text{П}}$), находящихся в объеме Fdx , то (3.8) можно переписать так:

$$d\dot{G}_{\text{К}} = d(w_{\text{К}} f_{\text{К}} \rho_{\text{К}}) = -j_{\text{К-П}} \pi D_{\text{К}}^2 n_{\text{v}} F dx, \quad (3.9)$$

где

$w_{\text{К}}$ - скорость капельного потока, м/с;

$f_{\text{К}}$ - площадь поперечного сечения, занятая жидкой фазой, м²;

πD_K^2 - поверхность капли, м²;

n_v - концентрация капель (количество капель в единице объема), 1/м³;

$j_{K-\Pi}$ - плотность потока испарившейся массы пара, кг/(м²с).

Уравнение (3.9) является дифференциальным уравнением сохранения массы для капельного потока при дисперсном режиме течения. В ряде случаев его более удобно записать через расход капельного потока \dot{G}_K и диаметр капли D_K . Для этого вначале найдем связь между концентрацией n_v и потоком капель \dot{n} , (1/сек).

Пусть поперечное сечение канала площадью F пронизывается потоком капель \dot{n} , тогда за время $d\tau$ в элементарном объеме Fdx окажется $\dot{n} d\tau$ капель. Так как $d\tau = dx/w_K$, то будем иметь

$$n_v = \frac{\dot{n} d\tau}{Fdx} = \frac{\dot{n} dx}{w_K F dx} = \frac{\dot{n}}{w_K F} \quad (3.10)$$

Капельный поток массы найдем по формуле

$$\dot{G}_K = V_K \rho_K \dot{n} = \frac{\pi D_K^3}{6} \rho_K \dot{n} \quad (3.11)$$

Умножив и разделив правую часть (3.9) на выражение $6D_K \rho_K$ с учетом (3.10) и (3.11) получим

$$\frac{d}{dx} (w_K \rho_K f_K) = - \frac{6 j_{K-\Pi} \dot{G}_K}{w_K D_K \rho_K} \quad (3.12)$$

Вводя понятие интенсивности потока массы на единицу длины канала

$$\dot{J}_{K-\Pi} = j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v F, \quad (3.13)$$

перепишем формулу (3.9) в иной форме

$$\frac{d}{dx} (w_K \rho_K f_K) = - \dot{J}_{K-\Pi} \quad (3.14)$$

Уравнение сплошности для парового (несущего) потока запишется в виде

$$\frac{d}{dx} (w_{\Pi} \rho_{\Pi} f_{\Pi}) = \dot{J}_{K-\Pi} \quad (3.15)$$

Складывая (3.14) и (3.15), получим уравнение сплошности для всего парок капельного потока, движущегося в адиабатическом канале с непроницаемыми стенками

$$\frac{d}{dx}(w_k \rho_k f_k) + \frac{d}{dx}(w_{\Pi} \rho_{\Pi} f_{\Pi}) = 0. \quad (3.16)$$

Если в стационарном потоке имеет место конденсация пара на каплях и пленке ($T_k < T_{\Pi}$, $T_{\Pi л} < T_{\Pi}$), то уравнение сохранения элементарных потоков массы будет иметь вид

$$d\dot{G}_k = d\dot{G}_{\Pi-k} + d\dot{E}_{yH} - d\dot{D}_{OC}, \quad (3.18)$$

$$d\dot{G}_{\Pi} = -d\dot{G}_{\Pi-k} - d\dot{G}_{\Pi-\Pi л}, \quad (3.19)$$

$$d\dot{G}_{\Pi л} = d\dot{G}_{\Pi-\Pi л} - d\dot{E}_{yH} + d\dot{D}_{OC}. \quad (3.20)$$

Рассмотрим случай, когда парок капельный поток с испаряющимися каплями движется в адиабатическом канале, по стенкам которого течет холодная жидкость ($T_{\Pi л} < T_{\Pi}$). Тогда уравнения материального баланса примут вид

$$d\dot{G}_k = d\dot{E}_{yH} - d\dot{D}_{OC} - d\dot{G}_{k-\Pi}, \quad (3.21)$$

$$d\dot{G}_{\Pi} = d\dot{G}_{k-\Pi} - d\dot{G}_{\Pi-\Pi л}, \quad (3.22)$$

$$d\dot{G}_{\Pi л} = d\dot{D}_{OC} - d\dot{E}_{yH} + d\dot{G}_{\Pi-\Pi л}. \quad (3.23)$$

Часто при рассмотрении задач движения двухфазного потока в каналах необходимо выразить одни физические величины через другие с целью приведения уравнений к более удобному для анализа или решения виду. Так, например, выражение секундного расхода жидкой фазы для монодисперсного потока можно представить в форме

$$\dot{G}_k = w_k \rho_k f_k = \frac{\pi D_k^3}{6} \rho_k \dot{n} = n_v \frac{\pi D_k^3}{6} \rho_k w_k F, \quad (3.24)$$

откуда получаются следующие уравнения связи:

$$\dot{n} = n_v w_k F, \quad f_k = \frac{\pi D_k^3 \dot{n}}{6 w_k}, \quad \frac{f_k}{F} = n_v \frac{\pi D_k^3}{6}.$$

После знакомства с записью основных уравнений сохранения потоков массы перейдем к изучению массопереноса на границе раздела фаз.

При рассмотрении двухкомпонентных систем, когда жидкость испаряется в несобственный пар (например, вода - воздух) локальную плотность потока испаряющейся массы каплей можно записать в виде

$$j_i = \beta(c_{iw} - c_{i\infty}), \quad (3.25)$$

где β - локальный коэффициент массопереноса, м/с;

$c_{iw}, c_{i\infty}$ - концентрации испаряющегося i -го вещества на поверхности раздела жидкость-газ и на бесконечности, кг/м³.

Концентрация i -го компонента в смеси может быть выражена через его парциальное давление

$$c_i = \frac{G_i}{V_{см}} = \frac{P_i}{R_i T_{см}}, \quad (3.26)$$

где $R_i = R_0 / \mu_i$ - газовая постоянная, Дж/(кг·К), $R_0 = 8314$ Дж/(кмоль·К) - универсальная газовая постоянная;

μ_i - молекулярная масса, которая для паров воды равна 18 кг/кмоль.

Коэффициент массопереноса определяют из критериальных уравнений. Так, например, при обтекании газом плоской поверхности испаряющегося вещества при ламинарном течении газа ($Re_r = \frac{w_r l}{\nu_r} < 10^5$) можно написать

$$Sh = \frac{\bar{\beta} l}{D} = 0,646 Re_r^{0,5} Sc^{0,33}, \quad (3.27)$$

где Sh - критерий Шервуда; $Sc = \frac{\nu_r}{D}$ - критерий Шмидта;

$\bar{\beta} = \frac{1}{l} \int_0^l \beta(x) dx$ - средний коэффициент массопереноса; l - длина пластины;

$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \frac{P_0}{P}$ - коэффициент диффузии, м²/с; $D_0 = 22 \cdot 10^{-6}$ м²/с -

коэффициент диффузии для системы вода-воздух при нормальных условиях ($p_0 = 760$ мм рт. ст. = $760/750 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 273$ К); $n = 1,5 \dots 2,5$.

При обтекании газовым потоком капли $\bar{\beta}$ находят из критериального уравнения

$$Sh = 2 + 0,6 Re^{0,5} Sc^{0,33}, \quad (3.28)$$

где $Re = \frac{D_k |w_r - w_k|}{\nu_r}$; $Sh = \frac{\bar{\beta} D_k}{D}$; D_k - диаметр капли.

В формуле (3.28) первое слагаемое в правой части определяет массоперенос на молекулярном уровне, второе - на молярном (за счет конвекции), которое называется "ветровым множителем".

Вопрос массопереноса на границе жидкость - собственный пар до сих пор остается открытым [18]. Однако в этом случае часто используют формулу Герца-Кнудсена. Для того чтобы понять механизм молекулярного массопереноса рассмотрим конденсацию неподвижного чистого пара на вертикальной стенке при $T_w < T_s$. Поток пара, конденсирующегося на поверхности пленки обозначим $j_{п-пл}$, а поток

пара от жидкости - $j_{пл-п}$. Тогда результирующий поток массы пара равен $\Delta j = j_{п-пл} - j_{пл-п} = (\rho_{п} w_{п})_{T_s} - (\rho_{п} w_{п})_{T_{пл}}$. Подставляя сюда выражение для плотности

пара из уравнения Клапейрона $\rho_{п} = \frac{p_{п}}{R_{п} T_{п}}$ и

средней скорости молекул пара, определенной по кинетической теории

газов $w_{п} = \sqrt{\frac{R_{п} T_{п}}{2\pi}}$, получим формулу Герца-

Кнудсена

$$\Delta j = \frac{1}{\sqrt{2\pi R_{п}}} \left(\frac{p_s}{\sqrt{T_s}} - \frac{p_{п}(T_{пл})}{\sqrt{T_{пл}}} \right). \quad (3.28a)$$

Действительный результирующий поток массы между паром и пленкой отличается от подсчитанного по формуле (3.28a): $\Delta j_d = \Delta j \chi$,

где χ - коэффициент конденсации, определяемый отношением количества

захваченных пленкой молекул пара к количеству молекул, ударившихся о поверхность пленки - $\chi = \frac{n_{захв}}{n_{удар}}$. Более поздние исследования [23] показали,

что $\Delta j_d = \Delta j f(\chi)$, где $f(\chi) = \frac{\chi}{1 - 0,4\chi}$; $\chi = \frac{35}{p_s^{0,56}}$.

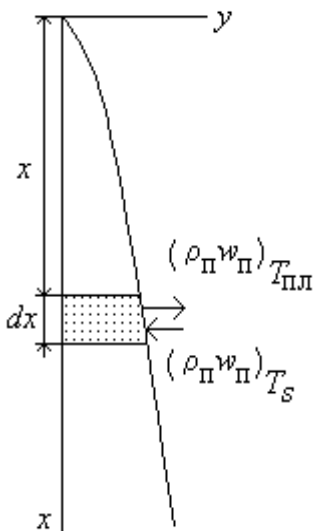


Рис.3.2

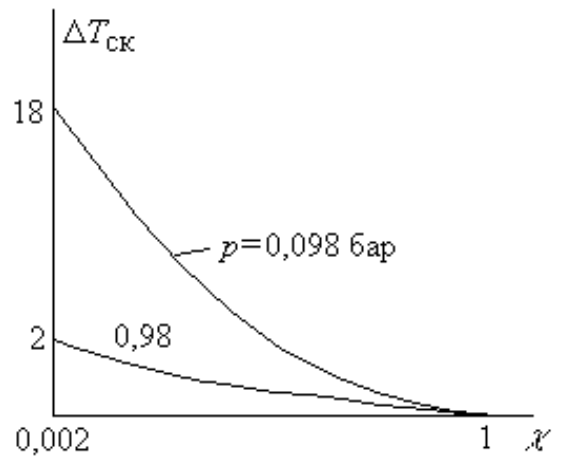


Рис.3.1

Чем больше ударившихся молекул отражается от поверхности пленки, тем больше скачок температур (см. рис.3.1) в кнудсеновском слое, равном длине свободного пробега молекулы. В этом случае термическое сопротивление при передаче теплоты от пара к стенке складывается из сопротивления пленки и сопротивления на границе раздела фаз. Зависимость $\Delta T_{ск} = f(\chi, p_s)$ характеризуется уменьшением скачка температуры при стремлении χ к единице и с увеличением давления насыщения.

При конденсации пара на холодных капля ($T_k < T_{п} = T_s(p_{п})$) плотность потока конденсирующегося пара может быть представлена в виде:

$$j_{п-к} = \frac{\kappa_{\text{конд}}}{(1 - 0,4\kappa_{\text{конд}})} \left(\frac{p_{п}}{\sqrt{T_{п}}} - \frac{p_{п}(T_{к})}{\sqrt{T_{к}}} \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi R_{п}}}, \quad (3.29)$$

где в качестве первого приближения коэффициент конденсации при $p_s = 700 \dots 10^5$ Па можно определить по формуле [23]

$$\kappa_{\text{конд}} = \frac{35}{p_s^{0,56}}. \quad (3.30)$$

В [30], где подробно рассматриваются вопросы тепло – и массопереноса на границе раздела фаз, приводится формула при $\kappa_{\text{конд}} = 1$

$$j_{п-к} = 1,67 (p_{п}(T_{к}) - p_{п}) \left(1 + 0,515 \ln \left(\frac{p_{п}}{p_{п}(T_{к})} \sqrt{\frac{T_{к}}{T_{п}}} \right) \right) \frac{1}{\sqrt{2\pi R_{п} T_{п}}} \quad (3.29a)$$

Следует отметить, что строго говоря, формулы (3.29) и (3.29a) справедливы лишь в случае, когда радиус капли меньше длины свободного пробега молекул

$l' = \frac{3}{2} \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{\pi R_{п} T}{2}}$ [5], однако несмотря на это приведенные формулы используется

и в случае, когда $R_{к} > l'$. В расчетной практике также широко используется и формула Максвелла. Так, для испаряющейся капли при $\kappa_{\text{исп}} = 1$ плотность потока пара [8]

$$j_{к-п} = (\rho_{п}(T_{к}) - \rho_{п}(T_{п})) \sqrt{\frac{R_{п} T_{п}}{2\pi}} = \frac{p_{п}(T_{к}) - p_{п}(T_{п})}{\sqrt{2\pi R_{п} T_{п}}}. \quad (3.31)$$

В дальнейшем при записи уравнений сохранения при наличии фазовых переходов мы будем использовать символ плотности потока массы j , не вдаваясь в его физическую природу.

3.2. Уравнения движения

В курсе гидродинамики сплошной среды [7] доказывается, что скорость изменения количества движения некоторой материальной системы равна главному вектору всех внешних сил, приложенных к данной системе:

$$\frac{d\vec{K}}{d\tau} = \vec{R}, \quad (3.32)$$

где $\vec{R} = \sum_{i=1}^n \vec{R}_i$.

Рассмотрим одномерный полидисперсно-кольцевой поток, в котором капли разбиты на группы. За время $d\tau$ поток внесет в элементарный объем Fdx количество движения

$$\left(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi} + \sum_{i=1}^n \dot{G}_{K_i} w_{K_i} + \dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda} \right) d\tau . \quad (a)$$

За это же время из элементарного объема поток вынесет количество движения $\left(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi} + d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) + \sum_{i=1}^n \dot{G}_{K_i} w_{K_i} + d\left(\sum_{i=1}^n \dot{G}_{K_i} w_{K_i} \right) + \dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda} + d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda}) \right) d\tau .$ (b)

Вычитая из (b) (a) и учитывая (3.32), получим

$$d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) + d\left(\sum_{i=1}^n \dot{G}_{K_i} w_{K_i} \right) + d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda}) = -Fdp - \tau_w \pi D dx , \quad (3.33)$$

где τ_w - касательное напряжение на стенке.

Здесь и в дальнейшем мы будем считать, что вязкость несущего потока проявляет себя лишь на границах раздела капли-пар и пар-стенка.

Для монодисперсного потока будем иметь:

$$d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) + d(\dot{G}_K w_K) = -Fdp - \tau_w \pi D dx . \quad (3.34)$$

Если запись второго слагаемого в правой части уравнения очевидна и представляет элементарную силу касательного напряжения на стенке, то запись результирующей силы статического давления Fdp нуждается в пояснении. Для двух бесконечно близких сечений, находящихся на расстоянии dx , имеем площади живого сечения F и $F+dF$. На площадь F действует сила статического давления pF , а на $F+dF$ - сила $(p+dp)(F+dF)$. Со стороны стенок канала поток испытывает силу pdF . Алгебраически складывая эти силы, получим результирующую силу статического давления с точностью до 1-го порядка малости

$$dR_x = pF - (p+dp)(F+dF) + pdF = -Fdp .$$

При записи уравнения движения для составляющих потока (пара, капель, пленки) необходимо учитывать количество движения, которое они теряют или приобретают за счет уноса или осаждения жидкости на поверхности пленки, испарения или конденсации массы на поверхности капель и пленки, имеющих свои скорости. В рассматриваемом случае внутренние диссипативные силы всего потока для составляющих потока становятся внешними. Исходя из сказанного, для дисперсно-кольцевого испаряющегося потока ($T_K > T_{\Pi}$ и $T_{\Pi\Lambda} > T_{\Pi}$) можно написать:

$$d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) = w_K d\dot{G}_{K-\Pi} + w_{\Pi\Lambda} d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi} - D^* n_v F dx - f_n dp - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} , \quad (3.35)$$

$$d(\dot{G}_K w_K) = -w_K d\dot{G}_{K-\Pi} + w_{\Pi\Lambda} d\dot{E}_{\gamma H} - w_K d\dot{D}_{OC} + D^* n_v F dx - f_K dp , \quad (3.36)$$

$$d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda}) = -w_{\Pi\Lambda} d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi} - w_{\Pi\Lambda} d\dot{E}_{vH} + w_K d\dot{D}_{OC} - f_{\Pi\Lambda} dp + \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - \tau_W dS_W, \quad (3.37)$$

где $D^* = c_x \pi D_K^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_K) |w_{\Pi} - w_K| / 8$ - сила сопротивления единичной капли, которая может принимать как положительное, так и отрицательное значение; $c_x = f(Re_K)$ - коэффициент сопротивления капли; $Re_K = \frac{D_K |w_{\Pi} - w_K| \rho_{\Pi}}{\mu_{\Pi}}$; μ_{Π} - коэффициент динамической вязкости пара; τ_{gl} - касательное напряжение, действующее между паром и пленкой.

Отметим, что наличие примесей в потоке приводит к росту вязкости несущей среды. Так, для потока, содержащего твердые сферические частицы, она может быть определена по формуле Эйнштейна [22] $\mu^* = \left(1 + \frac{5}{2} \alpha\right)$, где

α - объемная доля частиц.

Складывая уравнения (3.35), (3.36) и (3.37), получим (3.34). Разрешая уравнения (3.35), (3.36) и (3.37) относительно $\dot{G}_i w_i$ с учетом (3.1), (3.2) и (3.3), найдем, что

$$\dot{G}_{\Pi} dw_{\Pi} = -f_{\Pi} dp - D^* n_v F dx - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - (w_{\Pi} - w_K) d\dot{G}_{K-\Pi} - (w_{\Pi} - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi}, \quad (3.38)$$

$$\dot{G}_K dw_K = -f_K dp + D^* n_v F dx - (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{E}_{vH}, \quad (3.39)$$

$$\dot{G}_{\Pi\Lambda} dw_{\Pi\Lambda} = -f_{\Pi\Lambda} dp + \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - \tau_W dS_W + (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{D}_{OC}, \quad (3.40)$$

или разрешая относительно производных можно написать:

$$\frac{dw_{\Pi}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\Pi}} \left[-f_{\Pi} \frac{dp}{dx} - D^* n_v F - \tau_{gl} \frac{dS_{\Pi\Lambda}}{dx} - (w_{\Pi} - w_K) \frac{d\dot{G}_{K-\Pi}}{dx} - (w_{\Pi} - w_{\Pi\Lambda}) \frac{d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi}}{dx} \right], \quad (3.41)$$

$$\frac{dw_K}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left[-f_K \frac{dp}{dx} + D^* n_v F - (w_K - w_{\Pi\Lambda}) \frac{d\dot{E}_{vH}}{dx} \right], \quad (3.42)$$

$$\frac{dw_{\Pi\Lambda}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\Pi\Lambda}} \left[-f_{\Pi\Lambda} \frac{dp}{dx} + \tau_{gl} \frac{dS_{\Pi\Lambda}}{dx} - \tau_W \frac{dS_W}{dx} + (w_K - w_{\Pi\Lambda}) \frac{d\dot{D}_{OC}}{dx} \right], \quad (3.43)$$

$$\text{где } \frac{d\dot{G}_{K-\Pi}}{dx} = \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_v F, \text{ кг/(с}\cdot\text{м)}; \quad \frac{d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi}}{dx} = j_{\Pi\Lambda-\Pi} \pi D_{\Pi\Lambda}.$$

Для монодисперсного потока с испаряющимися каплями ($T_K > T_{\Pi}$) уравнения (3.38) и (3.39) примут вид:

$$\dot{G}_{\Pi} dw_{\Pi} = -f_{\Pi} dp - D^* n_v F dx - \tau_W dS - (w_{\Pi} - w_K) d\dot{G}_{K-\Pi}, \quad (3.44)$$

$$\dot{G}_K dw_K = -f_K dp + D^* n_v F dx \quad . \quad (3.45)$$

Выполнив аналогичные выкладки для конденсирующегося дисперсно-кольцевого потока с учетом (3.18...3.20), можно получить

$$\dot{G}_\Pi dw_\Pi = -f_\Pi dp - D^* n_v F dx - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda}, \quad (3.46)$$

$$\dot{G}_K dw_K = -f_K dp + D^* n_v F dx - (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{E}_{\text{УН}} + (w_\Pi - w_K) d\dot{G}_{\Pi-K}, \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \dot{G}_{\Pi\Lambda} dw_{\Pi\Lambda} = & -f_{\Pi\Lambda} dp + \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - \tau_w dS_w + (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{D}_{OC} + \\ & + (w_\Pi - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda}. \end{aligned} \quad (3.48)$$

Для монодисперсного потока, в котором происходит конденсация пара на каплях ($T_\Pi > T_K$), уравнения движения записываются следующим образом:

$$\dot{G}_\Pi dw_\Pi = -f_\Pi dp - D^* n_v F dx - \tau_w dS_w \quad , \quad (3.49)$$

$$\dot{G}_K dw_K = -f_K dp + D^* n_v F dx + (w_\Pi - w_K) d\dot{G}_{\Pi-K}, \quad (3.50)$$

где $d\dot{G}_{\Pi-K} = \pi D_K^2 j_{\Pi-K} n_v F dx$ - элементарный поток конденсирующегося пара на каплях.

Для случая, когда паро-капельный поток с испаряющимися каплями движется в адиабатическом канале, по стенкам которого течет холодная пленка можно написать:

$$d(\dot{G}_\Pi w_\Pi) = w_K d\dot{G}_{K-\Pi} - w_\Pi d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} - f_\Pi dp - D^* n_v F dx - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} \quad (3.51)$$

$$d(\dot{G}_K w_K) = -w_K d\dot{G}_{K-\Pi} + w_{\Pi\Lambda} d\dot{E}_{\text{УН}} - f_K dp + D^* n_v F dx - w_K d\dot{D}_{OC}, \quad (3.52)$$

$$d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda}) = w_\Pi d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} - w_{\Pi\Lambda} d\dot{E}_{\text{УН}} - f_{\Pi\Lambda} dp + w_K d\dot{D}_{OC} + \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - \tau_w dS_w. \quad (3.53)$$

Выполнив дифференцирование левых частей уравнений и разрешая их относительно $\dot{G}_i dw_i$ с учетом (3.21...3.23), получим

$$\dot{G}_\Pi dw_\Pi = -f_\Pi dp - D^* n_v F dx - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - (w_\Pi - w_K) d\dot{G}_{K-\Pi} \quad , \quad (3.54)$$

$$\dot{G}_K dw_K = -f_K dp + D^* n_v F dx - (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{E}_{\text{УН}} \quad , \quad (3.55)$$

$$\dot{G}_{\Pi\Lambda} dw_{\Pi\Lambda} = -f_{\Pi\Lambda} dp + \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda} - \tau_w dS_w + (w_K - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{D}_{OC} + (w_\Pi - w_{\Pi\Lambda}) d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} \quad (3.56)$$

Слагаемые типа $(w_\Pi - w_K) d\dot{G}_{K-\Pi}$ называются силой Мещерского. Из уравнений (3.38) и (3.47) следует, что в двухфазном потоке с испаряющимися каплями эта сила тормозит паровой поток и ускоряет капельный при конденсации пара. Несмотря на то, что поток испаряющихся капель (см. формулу 3.36) или поток конденсирующегося пара теряют количество

движения за счет фазовых переходов, в уравнениях движения, записанных относительно $\dot{G}_i dw_i$ (см. (3.39) и (3.46)), сила Мещерского отсутствует. Для того чтобы избежать ошибок в написании уравнений движения при исследовании двухфазных потоков, необходимо за основу брать уравнения типа (3.35), (3.36) и (3.37) и далее, с учетом уравнений сохранения массы (3.1)-(3.3), выполнять нужные преобразования.

Если течение нестационарное, то локальное изменение количества движения, например, фиксированного элемента паровой составляющей испаряющегося потока ($T_K > T_{\Pi}$, $T_{\Pi\Lambda} > T_{\Pi}$) в единицу времени обусловлено потоками количества движения через границы выделенного объема как собственного пара, так и пара, образовавшегося при испарении капель и пленки, а также действием внешних сил, приложенных к нему, то есть

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(G_{\Pi} w_{\Pi}) = -\frac{\partial}{\partial x}(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) dx + w_K d\dot{G}_{K-\Pi} + w_{\Pi\Lambda} d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi} - f_{\Pi} dp - D^* n_v F dx - \tau_{gl} dS_{\Pi\Lambda}. \quad (3.57)$$

Часто при рассмотрении двухфазных потоков вводят понятие объемной доли $\alpha_i = \frac{dV_i}{dV}$, где $dV = dV_{\Pi} + dV_K + dV_{\Pi\Lambda}$. Для нашего случая будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(w_{\Pi} G_{\Pi}) &= \frac{\partial}{\partial \tau}(w_{\Pi} \rho_{\Pi} \alpha_{\Pi}) dV, & \frac{\partial}{\partial x}(w_{\Pi} \dot{G}_{\Pi}) dx &= \frac{\partial}{\partial x}(w_{\Pi}^2 \rho_{\Pi} \alpha_{\Pi}) dV, \\ w_K d\dot{G}_K &= w_K j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v dV, & w_{\Pi\Lambda} d\dot{G}_{\Pi\Lambda} &= w_{\Pi\Lambda} j_{K-\Pi} \pi D_{\Pi\Lambda} dx = \\ &= \frac{4w_{\Pi\Lambda}}{D_{\Pi\Lambda}} j_{\Pi\Lambda-\Pi} (\alpha_K + \alpha_{\Pi\Lambda}) dV, & f_{\Pi} dp &= f_{\Pi} \frac{\partial p}{\partial x} dx = \frac{\partial p}{\partial x} dV_{\Pi} = \alpha_{\Pi} \frac{\partial p}{\partial x} dV. \end{aligned}$$

Теперь уравнению (3.57) можно придать вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(w_{\Pi} \rho_{\Pi} \alpha_{\Pi}) &= -\frac{\partial}{\partial x}(w_{\Pi}^2 \rho_{\Pi} \alpha_{\Pi}) + w_K j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v + \frac{4w_{\Pi\Lambda}}{D_{\Pi\Lambda}} j_{\Pi\Lambda-\Pi} (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) - \\ &- \alpha_{\Pi} \frac{\partial p}{\partial x} - D^* n_v - \frac{4\tau_{gl}}{D_{\Pi\Lambda}} (\alpha_K + \alpha_{\Pi}). \end{aligned} \quad (3.58)$$

Возможен и другой подход при выводе уравнения движения. Как и в предыдущем случае, рассмотрим испаряющийся поток. Количество движения элемента паровой фазы равно

$$K_{\Pi} = w_{\Pi} dG_{\Pi} = w_{\Pi} \rho_{\Pi} dV_{\Pi}. \quad (3.59)$$

Возьмем полную производную по времени от (3.59):

$$\begin{aligned} \frac{dK_{\Pi}}{d\tau} &= \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} dG_{\Pi} + w_{\Pi} \frac{d}{d\tau}(dG_{\Pi}), \quad \text{но } dG_{\Pi} = \rho_{\Pi} dV_{\Pi}, \quad \text{тогда} \\ \frac{dK_{\Pi}}{d\tau} &= \rho_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} dV_{\Pi} + w_{\Pi} \frac{d}{d\tau}(\rho_{\Pi} dV_{\Pi}) = \alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} dV + \\ &+ w_{\Pi} \frac{d}{d\tau}(\rho_{\Pi} \alpha_{\Pi}) dV. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Введем понятие интенсивности источника массы

$$j = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{dG_{\Pi}}{dV} \right) = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\rho_{\Pi} dV_{\Pi}}{dV} \right). \quad (3.61)$$

Перепишем (3.60) с учетом (3.61):

$$\frac{dK_{\Pi}}{d\tau} = \left(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} + w_{\Pi} (j_{K-\Pi} + j_{\Pi\Lambda-\Pi}) \right) dV, \quad (3.62)$$

где $j_{K-\Pi} = \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_v$, кг/(м³с), $j_{\Pi\Lambda-\Pi} = \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} j_{\Pi\Lambda-\Pi} (\alpha_{\Pi} + \alpha_K)$.

Скорость изменения количества движения парового элемента зависит не только от внешних сил, действующих на элемент, но и от потоков количества движения испарившихся капель и пленки $(w_K j_{K-\Pi} + w_{\Pi\Lambda} j_{\Pi\Lambda-\Pi}) dV$. Исходя из сказанного, уравнение движения можно записать в виде:

$$\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} = -(w_{\Pi} - w_K) j_{K-\Pi} - (w_{\Pi} - w_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} - \alpha_{\Pi} \frac{\partial p}{\partial x} - D^* n_v - \frac{4\tau_{gl}}{D_{\Pi\Lambda}} (\alpha_{\Pi} + \alpha_K). \quad (3.63)$$

Так как $\vec{w} = f(x, y, z, \tau)$, то

$$d\vec{w} = \frac{\partial \vec{w}}{\partial x} dx + \frac{\partial \vec{w}}{\partial y} dy + \frac{\partial \vec{w}}{\partial z} dz + \frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau} d\tau,$$

$$\frac{d\vec{w}}{d\tau} = w_x \frac{\partial \vec{w}}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vec{w}}{\partial y} + w_z \frac{\partial \vec{w}}{\partial z} + \frac{\partial \vec{w}}{\partial \tau}.$$

Для одномерного нестационарного потока можно написать

$$\frac{dw}{d\tau} = w \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial \tau}, \text{ тогда уравнение движения примет вид:}$$

$$\rho_{\Pi} \alpha_{\Pi} \left(\frac{\partial w_{\Pi}}{\partial \tau} + w_{\Pi} \frac{\partial w_{\Pi}}{\partial x} \right) = -(w_{\Pi} - w_K) j_{K-\Pi} - (w_{\Pi} - w_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} - \alpha_{\Pi} \frac{\partial p}{\partial x} - D^* n_v - (\alpha_{\Pi} + \alpha_K) \frac{4\tau_{gl}}{D_{\Pi\Lambda}} \quad (3.64).$$

В случае одномерного стационарного потока

$$\begin{aligned} \frac{dw_{\Pi}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\Pi}} \left[-(w_{\Pi} - w_K) j_{K-\Pi} F_{K-\Pi} - (w_{\Pi} - w_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} F_{K-\Pi} - \right. \\ \left. - \alpha_{\Pi} F_{K-\Pi} \frac{dp}{dx} - D^* n_v F_{K-\Pi} - (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) \frac{4F_{K-\Pi}}{D_{\Pi\Lambda}} \right]. \end{aligned} \quad (3.65)$$

Если обозначить $d\dot{G}_{\text{к-п}} = \pi D_{\text{к}}^2 j_{\text{к-п}} n_{\text{в}} F_{\text{к-п}} dx = j_{\text{к-п}} F dx$, то

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{G}_{\text{к-п}}}{dx} &= j_{\text{к-п}} F_{\text{к-п}}; \quad \frac{d\dot{G}_{\text{п\Lambda-п}}}{dx} = j_{\text{п\Lambda-п}} F_{\text{к-п}} = \\ &= \frac{4F_{\text{к-п}}}{D_{\text{п\Lambda}}} (\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{к}}) j_{\text{п\Lambda-п}} = j_{\text{п\Lambda-п}} \pi D_{\text{п\Lambda}}, \quad \text{и мы приходим к уравнению движения} \end{aligned}$$

для паровой составляющей в обычной форме (см. 3.41):

$$\begin{aligned} \frac{dw_{\text{п}}}{dx} &= \frac{1}{\dot{G}_{\text{п}}} \left[- (w_{\text{п}} - w_{\text{к}}) \frac{d\dot{G}_{\text{к-п}}}{dx} - (w_{\text{п}} - w_{\text{п\Lambda}}) \frac{d\dot{G}_{\text{п\Lambda-п}}}{dx} - D_{\text{в}}^* n_{\text{в}} F - \right. \\ &\left. - f_{\text{п}} \frac{dp}{dx} - \tau_{\text{gl}} \pi D_{\text{п\Lambda}} \right], \quad \text{где } \tau_{\text{gl}} \pi D_{\text{п\Lambda}} = \tau_{\text{gl}} dS_{\text{п\Lambda}} / dx. \end{aligned} \quad (3.66)$$

Рассмотрим более подробно силы, входящие в уравнения движения.

При больших относительных скоростях выражение $c_x \pi D_{\text{к}}^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}}) |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}| / 8$ представляет силу сопротивления одной капли, а $c_x \pi D_{\text{к}}^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}}) |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}| n_{\text{в}} F_{\text{п-к}} dx$ - сопротивление каплей, имеющих объемную концентрацию $n_{\text{в}}$ в элементарном объеме $F_{\text{п-к}} dx$. Для случая, когда вязкостные силы преобладают над инерционными ($\text{Re}_{\text{к}} \leq 0,1$), а обтекание единичной сферы потоком безотрывное, Стокс получил выражение $3\pi\mu_{\text{п}} D_{\text{к}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}})$. По определению коэффициент сопротивления c_x - это отношение силы сопротивления к силе, обусловленной динамическим напором $(\pi D_{\text{к}}^2 / 4) (\rho_{\text{п}} \Delta w^2 / 2)$, тогда

$$c_x = 3\pi\mu_{\text{п}} D_{\text{к}} \Delta w / (\pi D_{\text{к}}^2 \rho_{\text{п}} \Delta w^2 / 8) = 24\mu_{\text{п}} / (D_{\text{к}} \rho_{\text{п}} \Delta w) = 24 / \text{Re}_{\text{к}}.$$

Обобщение многочисленных опытных данных по обтеканию твердых сферических частиц в широком диапазоне изменения числа Рейнольдса ($0,1 \leq \text{Re}_{\text{к}} \leq 2 \cdot 10^4$) позволило получить аппроксимацию так называемой стандартной кривой [8]

$$\ln c_x = 3,271 - 0,8893 \ln \text{Re}_{\text{к}} + 0,03471 (\ln \text{Re}_{\text{к}})^2 + 0,001443 (\ln \text{Re}_{\text{к}})^3.$$

Однако в реальных потоках, например, с ростом концентрации частиц в потоке, c_x возрастает и становится больше, чем определяемый по стандартной кривой. Аналогичный эффект имеет место в высокоградиентных потоках. Увеличение степени турбулентности потока, особенно при больших числах $\text{Re}_{\text{к}}$ снижает c_x . В потоках, содержащих пузырьки или капли, возможна их деформация или даже разрушение (более подробно эти вопросы рассмотрены в [8],[9]), что отражается на c_x . Так, если ввести каплю в высокоскоростной поток газа, то она вначале примет форму эллипсоида, большая ось которого будет перпендикулярна потоку, а затем, если критерий Вебера $We = \rho_{\text{п}} D_{\text{к}} \Delta w^2 / \sigma$, характеризующий соотношение между силами динамического напора и поверхностного натяжения, будет больше критического значения ($We_{\text{кр}} = 6$), определяющего максимально устойчивый диаметр капли маловязкостной

жидкости, произойдет её разрушение на более мелкие капли. Отметим, что в плавно ускоряющихся потоках $We_{кр}$ может достигать 10...12 .

Если вязкость жидкости значительна, то критическое число Вебера следует определять по формуле [24]

$$We_{кр} = 12 + 14 \left(\frac{\mu_k^2}{\rho_k D_k \sigma} \right)^{0,8},$$

где выражение в скобках носит название “параметр устойчивости”.

Если капля вводится в поток при значительном числе Вебера ($We_0 > We_{кр}$), то в результате ее последовательного дробления образуется множество мелких капель, диаметр которых D_k можно определить из уравнения [11]

$$\left(\frac{D_k}{D_{k0}} \right)^{0,25} = \frac{1,9}{We_0^{0,25}} + 0,315 \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_k} \right)^{1,5} c_{x0} We_0^{0,125} \ln \left(\frac{D_{k0}}{D_k} \right),$$

где подстрочный индекс “0” относится к начальным условиям.

Японскими учеными [31] на основе модели: “срыва гребней сворачивающихся волн” была сделана попытка обобщить большое число опытных данных при кольцевом двухфазном течении в критериальном виде. С точностью $\pm 40\%$ большинство этих данных описывается соотношением

$$We_e(D_{vm}) = 0,028 Re_f^{-0,17} Re_g^{0,66} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0,33} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0,66},$$

где $We_e(D_{vm}) = \rho_g j_g^2 D_{vm} / \sigma$; $Re_f = \rho_f j_f D_h / \mu_f$ - число Рейнольдса для

жидкости; $Re_g = \rho_g j_g D_h / \mu_g$ - число Рейнольдса для газа;

j_f и j_g - объемные плотности потока жидкости и газа соответственно, м/с;

D_h - эквивалентный диаметр канала.

Объемный медианный диаметр образовавшейся капли предлагается определять по формуле

$$D_{vm} = 0,028 \frac{\sigma}{\rho_g j_g^2} Re_f^{-0,17} Re_g^{0,66} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{-0,33} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0,66}$$

В работе [31] отмечается, что при дроблении капель в газовом потоке критическое число Вебера может быть определено из выражения

$$We_{кр} = 12 + 14 (\mu_f^2 / (\rho_f D \sigma))^{0,8},$$

где D - диаметр капли.

Однако в пульсирующем потоке значение критического числа Вебера, как утверждают авторы, может снижаться на 50% по сравнению с величиной полученной из вышеприведенного выражения.

При расчетах двухфазных потоков с целью повышения точности результатов используют, как правило, экспериментальные зависимости $c_x = f(Re_k)$, найденные в заданном интервале изменения чисел Re_k . В качестве примера приведем некоторые из них.

В диапазоне изменения числа $Re_k=1...15$ часто используют формулу Клячко [8] $c_x = 24(1 + Re_k^{2/3}/6)/Re_k$. Если $15 \leq Re_k \leq 500$, то $c_x=48/Re_k$. В [9] для деформирующейся и дробящейся капли приводится формула $c_x \approx 0,265 Re_k^{0,25}$. Для газовзвесей при $Re_k > 1$ и объемной концентрации частиц в потоке $\alpha_k \leq 0,05$ коэффициент сопротивления может быть найден из выражения $c_x = c_x^0 \psi_\alpha \psi_{We} \psi_M$ [10],

где $c_x^0(Re_k) = \frac{24}{Re_k} + \frac{4}{Re^{0,5}} + 0,4$ - коэффициент сопротивления твердой сферической частицы, обтекаемой несжимаемым потоком;

$\psi_\alpha = (1 - \alpha_k)^{-2,7}$ - коэффициент, учитывающий стесненность обтекания;

$\psi_{We} = \exp(0,03 We^{1,5})$ - коэффициент, учитывающий деформацию капель ($0 \leq We \leq 25$);

$\psi_M = 1 + \exp\left(-\frac{0,427}{M^{4,63}} - \frac{3,0}{Re_k^{0,88}}\right)$ - поправка на сжимаемость несущего газа;

$M = \frac{\Delta w}{\sqrt{k R_\Pi T_\Pi}}$ - число Маха.

Получив определенные сведения о силе сопротивления капель в потоке, перейдем к рассмотрению сил трения на границе пар-пленка. Из уравнения Навье-Стокса для ламинарного режима течения и гладкой пленки, когда определяющими являются силы трения и статического давления, а выпадение капель в пленку отсутствует, можно получить

$$\mu_{\Pi\Lambda} \frac{\partial^2 w_{\Pi\Lambda}}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad .$$

Если изменение давления вдоль канала постоянного сечения подчиняется закону Дарси, то есть $\frac{dp}{dx} = \text{const}$, то уравнение принимает вид:

$$\mu_{\Pi\Lambda} \frac{d^2 w_{\Pi\Lambda}}{dy^2} - \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3.67)$$

Интегрируя (3.67), найдем

$$\frac{dw_{\Pi\Lambda}}{dy} = \frac{dp/dx}{\mu_{\Pi\Lambda}} y + C_1,$$

$$w_{\Pi\Lambda} = \frac{dp/dx}{\mu_{\Pi\Lambda}} \frac{y^2}{2} + C_1 y + C_2.$$

Из граничных условий: $y=0$, $w_{\text{Пл}} = 0$; $y=\delta$ (δ -толщина пленки),
 $\left(\frac{dw_{\text{Пл}}}{dy}\right)_{y=\delta} = \frac{\tau_{gl}}{\mu_{\text{Пл}}}$ определим константы интегрирования $C_1 = \frac{\tau_{gl}}{\mu_{\text{Пл}}} - \frac{dp/dx}{\mu_{\text{Пл}}}\delta$, $C_2=0$
 и закон изменения скорости жидкости по толщине пленки

$$w_{\text{Пл}} = \frac{dp/dx}{\mu_{\text{Пл}}} \frac{y^2}{2} + \left(\frac{\tau_{gl}}{\mu_{\text{Пл}}} - \frac{dp/dx}{\mu_{\text{Пл}}}\delta \right) y .$$

Определим среднюю скорость пленки

$$\bar{w}_{\text{Пл}} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_{\text{Пл}}(y) dy = -\frac{dp/dx}{3\mu_{\text{Пл}}}\delta^2 + \frac{\tau_{gl}}{2\mu_{\text{Пл}}}\delta . \quad (3.68)$$

Из баланса сил, действующих на элементарный объем

$$Fdp = \tau_{gl} D_{\text{Пл}} \pi dx , \text{ где } D_{\text{Пл}} = D - 2\delta ; D\text{-диаметр канала,}$$

определим градиент давления вдоль продольной оси канала

$$\frac{dp}{dx} = \frac{4\tau_{gl}}{D_{\text{Пл}}} .$$

Подставляя dp/dx в (3.68), получим

$$\bar{w} = \frac{\tau_{gl}\delta}{\mu_{\text{Пл}}} \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \frac{\delta}{D_{\text{Пл}}} \right) . \quad (*)$$

Используя (*), выразим касательное напряжение на границе раздела фаз
 через критерий Рейнольдса $\left(\text{Re}_{\text{Пл}} = \frac{\rho_{\text{Пл}} \bar{w} \delta}{\mu_{\text{Пл}}} \right)$: $\tau_{gl} = \frac{\text{Re}_{\text{Пл}} \mu_{\text{Пл}}^2}{\rho_{\text{Пл}} \delta^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \frac{\delta}{D_{\text{Пл}}} \right)}$.

Если под коэффициентом трения на межфазной поверхности понимать выражение

$$c_{f^{(gl)}} = \frac{2\tau_{gl}}{\rho_{\text{Пл}} \left(\bar{w}_{\text{Пл}} - w_{\text{Пл}}|_{y=\delta} \right)^2} , \text{ где } w_{\text{Пл}}|_{y=\delta} = a\bar{w}_{\text{Пл}} - \text{ скорость пленки при } y=\delta$$

(в зависимости от режима течения $a=1,5...2,5$ [8]), то

$$c_{f^{(gl)}} = \frac{2 \text{Re}_{\text{Пл}} \mu_{\text{Пл}}^2}{\rho_{\text{Пл}} \bar{w}_{\text{Пл}}^2 \left(1 - \frac{a\bar{w}_{\text{Пл}}}{\bar{w}_{\text{Пл}}} \right)^2 \rho_{\text{Пл}} \delta^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \frac{\delta}{D_{\text{Пл}}} \right)}$$

Умножив и разделив правую часть на $\rho_{\text{Пл}} \bar{w}_{\text{Пл}}^2$, получим

$$c_{f^{(gl)}} = \frac{2\rho_{\text{Пл}} \bar{w}_{\text{Пл}}^2}{\rho_{\text{Пл}} \bar{w}_{\text{Пл}}^2 \text{Re}_{\text{Пл}} \left(1 - \frac{a\bar{w}_{\text{Пл}}}{\bar{w}_{\text{Пл}}} \right)^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{3} \frac{\delta}{D_{\text{Пл}}} \right)} . \quad (3.69)$$

Для случая, когда $\bar{w}_{\text{Пл}} \gg \bar{w}_{\text{Пл}}$, а $\delta \ll D_{\text{Пл}}$

$$c_{f(gl)} = \frac{2\rho_{\text{пл}} \overline{w_{\text{пл}}}^2}{\rho_{\text{п}} \overline{w_{\text{п}}}^2 \text{Re}_{\text{пл}}}.$$

Однако значения коэффициента трения на межфазной границе, найденные из эксперимента, превышают расчетные, полученные в предположении гладкой поверхности пленки. Расхождение объясняется наличием волн на поверхности пленки, амплитуда которых возрастает с увеличением $\text{Re}_{\text{пл}}$, что приводит и к росту касательного напряжения трения. Поэтому предпочтение отдается опытным данным. Например, для дисперсно-кольцевого режима течения в трубах в диапазоне $93 \leq \text{Re}_{\text{пл}} \leq 720$ в работе [8] приводятся графики $c_{f(gl)} = f(\text{Re}_{\text{пл}})$. Используя один из графиков, мы получили аппроксимацию $c_{f(gl)} = [7 + 0,029(\text{Re}_{\text{пл}} - 93)] \cdot 10^{-3}$.

Приведенные выше зависимости $c_{f(gl)} = f(\text{Re}_{\text{пл}})$ и имеющиеся данные по $c_W = \varphi(\text{Re}_{\text{пл}})$ получены в основном для спутного движения пара и пленки в каналах при незначительной средней скорости пленки, когда $\text{Re}_{\text{пл}}$ не превышает 800. Однако в ряде технических устройств (соплах, работающих на двухфазных потоках, струйных насосах, инжекторах, турбинах, использующих в качестве рабочего тела вскипающую жидкость) $\text{Re}_{\text{пл}}$ может в 20...60 раз превышать указанное значение. Так, на выходе из рабочей лопатки гидропаровой турбины $\text{Re}_{\text{пл}} = (2...5) \cdot 10^4$. Поэтому для расчета высокоскоростных двухфазных потоков необходимо знать величину коэффициента трения c_W между высокоскоростным пристенным слоем жидкости и стенкой при больших числах $\text{Re}_{\text{пл}}$.

Исследования по определению c_W были проведены в ЛПИ в 1986 г. В.А.Барилевичем. Участок, на котором проводились опыты, состоял из открытого горизонтального лотка прямоугольного сечения шириной 14 мм и длиной 1000 мм. В начале канала было установлено сопло Лавалья, работающее на перегретой воде. Продольная ось сопла с осью канала составляла угол 15° (см. рис. 3.3). Срез сопла прямоугольной формы нижней гранью плотно прилегал к основанию канала. Измерение динамического напора потока осуществлялось плоской микротрубкой Прандтля, которая соединялась с образцовым манометром. Ширина рабочей части трубки равнялась 3 мм, толщина - 0,4 мм. Система крепления трубки обеспечивала ее перемещение вдоль и поперек канала с помощью супорта, контролировавшееся индикатором с ценой деления 0,01 мм. Движение зонда осуществлялось без "мертвого хода".

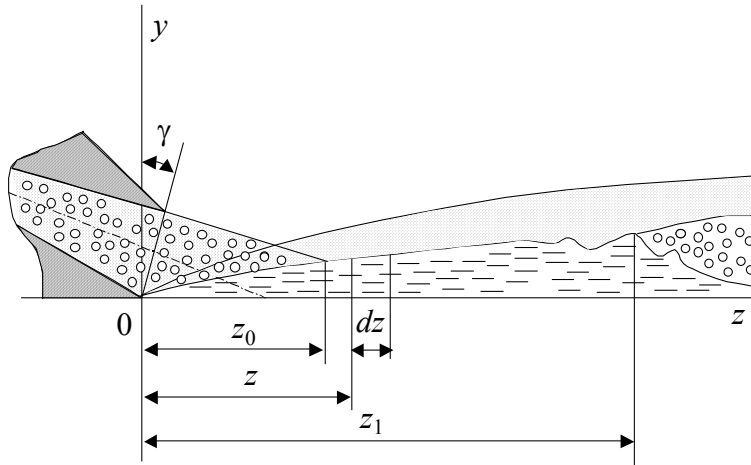


Рис. 3.3 К расчету коэффициента трения пристенного слоя жидкости

Перед началом опытов трубка Прандтля, соединительная трубка и манометр заполнялись водопроводной водой. Зонд вводился в поток при истекающей воде из трубки, затем водопроводный кран закрывался, образуя замкнутую систему зонд-манометр.

Исследования показали, что на начальном участке за соплом формируется высокоскоростной ускоряющийся пристенный слой жидкости. За зоной орошения существует участок, где отсутствует заметный срыв жидкости с поверхности слоя, так как здесь выполнялось условие $\delta \bar{w}_{\text{ПЛ}} = \text{const}$. На этом участке длиной 115 мм и проводилась основная серия опытов. Толщина пристенного жидкостного слоя определялась расстоянием от дна канала, на котором динамический напор достигал максимального значения.

Движение пристенного испаряющегося ($T_{\text{ПЛ}} > T_{\text{П}}$) слоя жидкости переменной массы в канале описывается уравнением

$$\dot{G}_{\text{ПЛ}} d\bar{w}_{\text{ПЛ}} = (w_{\text{К}} - \bar{w}_{\text{ПЛ}}) d\dot{D}_{\text{ОС}} - f_{\text{ПЛ}} dp - (\tau_{\text{W}} - \tau_{\text{gl}}) dS .$$

Для безградиентного течения на участке, где отсутствует приток массы капель, можно написать

$$\dot{G}_{\text{ПЛ}} d\bar{w}_{\text{ПЛ}} = -(\tau_{\text{W}} - \tau_{\text{gl}}) dS \quad \text{или} \quad \bar{w}_{\text{ПЛ}} \rho_{\text{ПЛ}} \delta d\bar{w}_{\text{ПЛ}} = -\tau_{\text{W}} \left(1 - \frac{\tau_{\text{gl}}}{\tau_{\text{W}}} \right) dx .$$

Так как $\tau_{\text{W}} = c_{\text{W}} \rho_{\text{ПЛ}} \bar{w}_{\text{ПЛ}}^2 / 2$, а $\tau_{\text{gl}} = c_{\text{gl}} \rho_{\text{П}} (\bar{w}_{\text{П}} - \bar{w}_{\text{ПЛ}})^2 / 2$, то

$$\delta d\bar{w}_{\text{ПЛ}} = \frac{c_{\text{W}} \bar{w}_{\text{ПЛ}}}{2} \left(1 - \frac{c_{\text{gl}} \rho_{\text{П}} (\bar{w}_{\text{П}} - \bar{w}_{\text{ПЛ}})^2}{c_{\text{W}} \rho_{\text{ПЛ}} \bar{w}_{\text{ПЛ}}^2} \right) dx .$$

Если принять, что c_{gl} и c_{W} - величины одного порядка, то в рассматриваемом случае $\tau_{\text{gl}} / \tau_{\text{W}} \approx (3...4) \cdot 10^{-3}$. Таким образом, локальное значение коэффициента трения найдем из выражения

$$c_{\text{W}} \approx - \frac{2\delta}{\bar{w}_{\text{ПЛ}}} \frac{d\bar{w}_{\text{ПЛ}}}{dx} . \quad (3.70)$$

Опыты показали, что средняя скорость пристенного слоя жидкости вдоль канала на участке устойчивого движения изменяется на разных режимах по линейному закону, т.е. $d\bar{w}_{\text{ПЛ}} / dx = \text{const}$.

Так, для одного из режимов ($d\bar{w}_{\text{ПЛ}} / dx = -129,4 \text{ с}^{-1}$) в начале участка

$$c_{w1} = \frac{2 \cdot 0,426 \cdot 10^{-3} \cdot 129,4}{36} = 3,063 \cdot 10^{-3}, \text{ в конце -}$$

$$c_{w2} = \frac{2 \cdot 0,727 \cdot 10^{-3} \cdot 129,4}{21} = 8,959 \cdot 10^{-3}.$$

Среднее значение \bar{c}_w для всего участка определим по формуле

$$\bar{c}_w = \left(\frac{\bar{w}_{\text{ПЛ1}}}{\bar{w}_{\text{ПЛ2}}} - 1 \right) \frac{2\delta_1}{(x_1 - x_2)} = \left(\frac{36}{21} - 1 \right) \frac{2 \cdot 0,426}{115} = 5,292 \cdot 10^{-3},$$

которая получается после интегрирования (3.70) с учетом уравнения сплошности $\delta = \delta_l \bar{w}_{\text{ПЛ1}} / \bar{w}_{\text{ПЛ}}$. На расстоянии 65 мм от нижнего среза сопла вниз по потоку

$$c_w = \frac{2 \cdot 0,45 \cdot 10^{-3} \cdot 129,4}{33,9} = 3,435 \cdot 10^{-3}, \text{ а динамический напор на расстоянии}$$

0,45 мм от дна канала составил 1,7 МПа (см. рис.3.4), что соответствовало скорости жидкости на границе слоя, равной 59,9 м/с. Чтобы представить, как велика эта скорость, уместно сравнить ее со скоростью автомобиля. Так, если автомобиль движется со скоростью 90 км/час, то за 1 секунду он проходит расстояние в 25 метров. В нашем случае средняя скорость воды составляла 122 км/час, а в слое толщиной 0,45 мм она изменялась от 0 до 216 км/час!

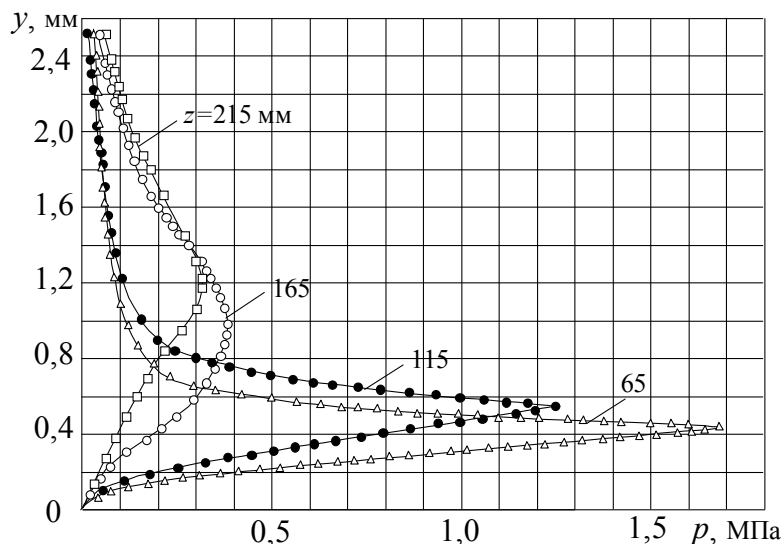


Рис. 3.4 Эпюры динамического напора пристенного слоя на различных расстояниях от среза сопла

Обработка

собственных опытных данных в критериальном виде позволила нам получить уравнение

$$c_w = 0,577 \cdot 10^{-9} \operatorname{Re}_x^{0,981}, \quad (3.71)$$

при $7 \cdot 10^6 \leq \operatorname{Re}_x \leq 11 \cdot 10^6$, где $\operatorname{Re}_x = \bar{w}_{\text{ПЛ}} x / \nu_{\text{ПЛ}}$.

Так как формирование пристенного жидкостного слоя определяется кинетической энергией двухфазной струи на выходе из сопла, то была сделана попытка найти зависимость коэффициента трения от двух параметров $c_w = f(\operatorname{Re}_x, Eu)$, где в данном случае критерий Эйлера характеризовал кинетическую энергию струи и становился определяющим. В этом случае (см. рис. 3.5) удалось получить критериальное уравнение в виде:

$$c_w = 0,46 \cdot 10^{-13} \operatorname{Re}_x^{1,62} Eu^{0,47} \quad (3.71a)$$

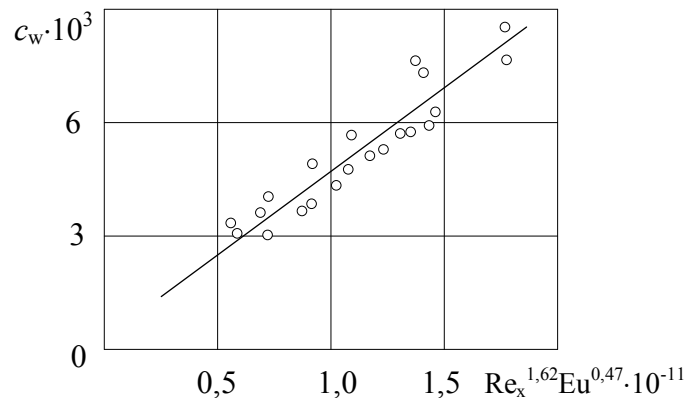


Рис. 3.5 Изменение локального коэффициента трения $c_w = \varphi(\operatorname{Re}_x, Eu)$

Число Re_δ изменялось от $4,8 \cdot 10^6$ до 10^7 . Критерий Eu определялся на срезе сопла и изменялся от 0,36 до 0,79, где $\rho = \dot{G} / (F \bar{w})_{cp}$.

Уоллис [11] для ламинарного режима течения предложил формулу $c_w = 16 / \operatorname{Re}_c$, где $\operatorname{Re}_c = \rho_{\text{ПЛ}} (1 - \alpha) \bar{w}_{\text{ПЛ}} D / \mu_{\text{ПЛ}}$, $\alpha = dV_{\text{П}} / dV$ - истинное объемное паросодержание; D - диаметр канала.

При турбулентном режиме течения пленки в качестве первого приближения он рекомендует принимать $c_w \approx 0,005$, что подтверждается и нашими опытными данными.

3.3. Уравнения энергии

Для неадиабатического стационарного многофазного потока, который не совершает технической работы, сумма входящих в элементарный объем $F dx$ и выходящих потоков теплоты и энтальпии смеси по заторможенным параметрам равна нулю, то есть

$$\dot{i}_{CM}^* + q_w \pi D dx - (\dot{i}_{CM}^* + d\dot{i}_{CM}^*) = 0,$$

$$\text{где } \dot{i}_{CM}^* = \sum_{i=1}^n \dot{i}_i^*, \quad \dot{i}_i^* = \dot{G}_i i_i^* = \dot{G}_i (i_i + w_i^2 / 2).$$

Раскрывая, найдем что

$$d\dot{i}_{CM}^* = q_w \pi D dx. \quad (3.72)$$

Для однокомпонентного адиабатического дисперсно-кольцевого потока (пар, капли, пленка) можно написать

$$\dot{G}_\Pi i_\Pi^* + \dot{G}_K i_K^* + \dot{G}_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^* = const. \quad (3.73)$$

Дифференцируя (3.73), получим

$$d(\dot{G}_\Pi i_\Pi^* + \dot{G}_K i_K^* + \dot{G}_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^*) = 0. \quad (3.74)$$

Чтобы найти значения энтальпии пара, капель и пленки вдоль канала, а следовательно, и их температуры, необходимо к уравнению (3.74) добавить еще два уравнения, описывающие, например, изменение полной энтальпии парового и капельного потоков, проходящих через выделенный неподвижный элементарный объем. Тогда для парового потока при $T_{\Pi\Lambda} > T_\Pi$, $T_K > T_\Pi$ можно написать

$$\dot{i}_\Pi^{**} + d\dot{i}_{K-\Pi}^{**} + d\dot{i}_{\Pi\Lambda-\Pi}^{**} + d\dot{Q}_{K-\Pi} + d\dot{Q}_{\Pi\Lambda-\Pi} - (\dot{i}_\Pi^{**} + d\dot{i}_\Pi^{**}) = 0, \quad (3.75)$$

где входящие потоки:

\dot{i}_Π^{**} ; $d\dot{i}_{K-\Pi}^{**} = \pi D_K^2 j_{K-\Pi} i_{K-\Pi}^{**}(T_K) n_v F_{\Pi K} dx$, $d\dot{i}_{\Pi\Lambda-\Pi}^{**} = j_{\Pi\Lambda-\Pi} i_{\Pi\Lambda}^{**}(T_{\Pi\Lambda}) dS_{\Pi\Lambda}$ -элементарные потоки энтальпии сухого насыщенного пара от испаряющихся капель и пленки соответственно;

$F_{\Pi K} = f_\Pi + f_K$ - площадь поперечного сечения, занятая потоками пара и капель;

$d\dot{Q}_{K-\Pi} = \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi) \pi D_K^2 n_v F_{\Pi K} dx$, $d\dot{Q}_{\Pi\Lambda-\Pi} = \alpha_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_\Pi) dS_{\Pi\Lambda}$ -элементарные потоки теплоты, отданные паровому потоку от капель и пленки;

выходящий поток:

$(\dot{i}_\Pi^{**} + d\dot{i}_\Pi^{**}) = \dot{G}_\Pi i_\Pi^{**} + d(\dot{G}_\Pi i_\Pi^{**})$ - полная энтальпия парового потока на выходе из контрольного объема.

Приращение потока пара обусловлено испарением капель и пленки

$$d\dot{G}_\Pi = d\dot{G}_{K-\Pi} + d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi}. \quad (3.76)$$

Если следовать Кнудсену, то результирующие элементарные потоки массы можно записать так:

$$\begin{aligned} d\dot{G}_{K-\Pi} &= j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v F_{\Pi K} dx, \\ d\dot{G}_{\Pi\Lambda-\Pi} &= j_{\Pi\Lambda-\Pi} dS_{\Pi\Lambda}. \end{aligned} \quad (3.77)$$

Разрешая (3.75) относительно $d\dot{i}_\Pi^{**}$, найдем, что

$$\begin{aligned} d\dot{i}_\Pi^{**} &= d(\dot{G}_\Pi i_\Pi^{**}) = [j_{K-\Pi} i_{K-\Pi}^{**}(T_K) + \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi)] \times \\ &\times \pi D_K^2 n_v F_{(\Pi-K)} dx + [j_{\Pi\Lambda-\Pi} i_{\Pi\Lambda}^{**}(T_{\Pi\Lambda}) + \alpha_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_\Pi)] dS_{\Pi\Lambda}. \end{aligned} \quad (3.78)$$

Подставляя в (3.78) (3.76) и (3.77), определим:

$$\begin{aligned} d\dot{i}_\Pi^{**} &= [(i_\Pi^{**}(T_K) - i_\Pi^{**}) j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v F_{\Pi-K} dx + (i_\Pi^{**}(T_{\Pi\Lambda}) - i_\Pi^{**}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} dS_{\Pi\Lambda} + \\ &+ \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi) \pi D_K^2 n_v F_{\Pi-K} dx + \alpha_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_\Pi) dS_{\Pi\Lambda}] / \dot{G}_\Pi, \end{aligned} \quad (3.79)$$

где для цилиндрического канала с диаметром D $dS_{\Pi\Lambda} = (D - 2\delta_{\Pi\Lambda})\pi dx$.

Для тонких пленок можно считать $dS_{\Pi\Lambda} = D\pi dx$, а $F_{\Pi-K} = F$, тогда

$$\begin{aligned} \frac{di_{\Pi}^{**}}{dx} = & \left[(i_{\Pi}^{**}(T_K) - i_{\Pi}^{**}) j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v F + (i_{\Pi}^{**}(T_{\Pi\Lambda}) - i_{\Pi}^{**}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \pi D + \right. \\ & \left. + \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_{\Pi}) \pi D_K^2 n_v F + \alpha_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_{\Pi}) \pi D \right] / \dot{G}_{\Pi}. \end{aligned} \quad (3.80)$$

Изменение полной энтальпии капельного потока происходит за счет потока энтальпии пара с поверхности капель, теплоотдачи от капель, потока энтальпии с поверхности пленки $i_{\Pi\Lambda}^*$ и осаждения капель, имеющих энтальпию i_K^* .

$$d\dot{G}_K^* = d(\dot{G}_K i_K^*) = -d\dot{I}_{K-\Pi}^{**} - d\dot{Q}_{K-\Pi} + i_{\Pi\Lambda}^* d\dot{E}_{yH} - i_K^* d\dot{D}_{OC}. \quad (3.81)$$

Дифференцируя левую часть уравнения (3.81) и учитывая, что $d\dot{G}_K^* = d\dot{E}_{yH} - d\dot{D}_{OC} - d\dot{G}_{K-\Pi}$, найдем $d i_K^* / dx$:

$$\frac{di_K^*}{dx} = \left\{ - (i_{\Pi}^{**}(T_K) - i_K^*) j_{K-\Pi} - \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_{\Pi}) \right\} \pi D_K^2 n_v F - (i_K^* - i_{\Pi\Lambda}^*) \frac{d\dot{E}_{yH}}{dx} \Bigg/ \dot{G}_K \quad (3.82)$$

Уравнения (3.78) и (3.81) или (3.80) и (3.82) совместно с (3.74) позволяют определить $d i_{\Pi}^* / dx$, $d i_K^* / dx$ и $d i_{\Pi\Lambda}^* / dx$.

Вместо уравнения (3.74) можно написать дифференциальное уравнение, описывающее изменение полной энтальпии элемента пленки (пристенного слоя жидкости):

$$d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^*) = i_K^* \dot{D}_{OC} - d\dot{I}_{\Pi\Lambda-\Pi}^{**} - d\dot{Q}_{\Pi\Lambda-\Pi} - i_{\Pi\Lambda}^* d\dot{E}_{yH} \quad (3.83)$$

и из него найти $d i_{\Pi\Lambda}^* / dx$.

Действительно, с учетом уравнения сохранения секундной массы пленки

$$d\dot{G}_{\Pi\Lambda} = d\dot{D}_{OC} - d\dot{E}_{yH} - j_{\Pi\Lambda-\Pi} dS_{\Pi\Lambda} \quad \text{из (3.83) получим:}$$

$$\frac{di_{\Pi\Lambda}^*}{dx} = \left[(i_K^* - i_{\Pi\Lambda}^*) \frac{d\dot{D}_{OC}}{dx} - (i_{\Pi}^{**}(T_{\Pi\Lambda}) - i_{\Pi\Lambda}^*) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \frac{dS_{\Pi\Lambda}}{dx} - \alpha_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_{\Pi}) \frac{dS_{\Pi\Lambda}}{dx} \right] / \dot{G}_{\Pi\Lambda}. \quad (3.84)$$

Суммируя (3.78), (3.81) и (3.83), приходим к уравнению энергии для всего потока в форме (3.74).

Зная значения производных $d i_K^* / dx$ и $d i_{\Pi\Lambda}^* / dx$, определим

$$\frac{dT_K}{dx} = \frac{1}{c_{pK}} \left(\frac{di_K^*}{dx} - w_K \frac{dw_K}{dx} \right), \quad (3.85)$$

$$\frac{dT_{\Pi\Lambda}}{dx} = \frac{1}{c_{p\Pi\Lambda}} \left(\frac{di_{\Pi\Lambda}^*}{dx} - w_{\Pi\Lambda} \frac{dw_{\Pi\Lambda}}{dx} \right). \quad (3.86)$$

Температуру пара можно найти после интегрирования уравнения

$$\frac{di_{\Pi}^{**}}{dx} = \frac{di_{\Pi}^{**}}{dx} - w_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{dx} \quad (3.87)$$

или из уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dT_{\Pi}}{dx} = \frac{T_{\Pi} (v_{\Pi}'' - v_{\Pi}'') dp}{r dx}. \quad (3.88)$$

Рассмотрим адиабатный стационарный дисперсно-кольцевой режим течения для случая конденсирующегося потока ($T_K < T_{\Pi}$, $T_{\PiЛ} < T_{\Pi}$).

Изменение полной энтальпии парового потока обусловлено конденсацией пара, имеющего энтальпию $i_{\Pi}''^*$, на каплях и пленке и теплоотдачей от пара к каплям и пленке

$$d(\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}''^*) = -i_{\Pi}''^* j_{\Pi-K} \pi D_K^2 n_v F_{ПК} dx - i_{\Pi}''^* j_{\Pi-Пл} \pi D_{Пл} - \alpha_{\Pi-K} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_K^2 n_v F_{ПК} dx - \alpha_{\Pi-Пл} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_{Пл} dx \quad (3.89)$$

но $d\dot{G}_{\Pi-K} = j_{\Pi-K} \pi D_K^2 n_v F_{ПК} dx$, а $d\dot{G}_{\Pi-Пл} = j_{\Pi-Пл} \pi D_{Пл} dx$.

Тогда уравнение (3.89) можно переписать в виде:

$$d(\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}''^*) = -i_{\Pi}''^* d\dot{G}_{\Pi-K} - i_{\Pi}''^* d\dot{G}_{\Pi-Пл} - \alpha_{\Pi-K} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_K^2 n_v F_{ПК} dx - \alpha_{\Pi-Пл} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_{Пл} dx \quad (3.90)$$

Выполнив дифференцирование левой части уравнения и разрешая его относительно $\dot{G}_{\Pi} di_{\Pi}''^*$ с учетом, что

$$d\dot{G}_{\Pi} = -d\dot{G}_{\Pi-K} - d\dot{G}_{\Pi-Пл}, \quad \text{получим}$$

$$\frac{di_{\Pi}''^*}{dx} = -\frac{1}{\dot{G}_{\Pi}} \left[\alpha_{\Pi-K} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_K^2 n_v F_{ПК} + \alpha_{\Pi-К} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_{Пл} \right]. \quad (3.91)$$

Из уравнения (3.91) видно, что изменение удельной энтальпии $i_{\Pi}''^*$ зависит только от теплоотдачи.

Для капельного потока будем иметь:

$$d(\dot{G}_K i_K^*) = +i_{\Pi}''^* d\dot{G}_{\Pi-K} + i_{Пл}^* d\dot{E}_{\text{вн}} - i_K^* d\dot{D}_{\text{ос}} + \alpha_{\Pi-K} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_K^2 n_v F_{ПК} dx \quad (3.92)$$

Выполнив аналогичные операции, как в предыдущем случае с учетом, что $d\dot{G}_K = d\dot{E}_{\text{вн}} - d\dot{D}_{\text{ос}} + d\dot{G}_{\Pi-K}$, найдем

$$\frac{di_K^*}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left[(i_{\Pi}''^* - i_K^*) \frac{d\dot{G}_{\Pi-K}}{dx} - (i_K^* - i_{Пл}^*) \frac{d\dot{E}_{\text{вн}}}{dx} + \alpha_{\Pi-K} (T_{\Pi} - T_K) \pi D_K^2 n_v F \right]. \quad (3.93)$$

Для пристенного жидкостного слоя (пленки) можно написать

$$d(\dot{G}_{Пл} i_{Пл}^*) = i_{\Pi}''^* d\dot{G}_{\Pi-Пл} - i_{Пл}^* d\dot{E}_{\text{вн}} + i_K^* d\dot{D}_{\text{ос}} + \alpha_{\Pi-Пл} (T_{\Pi} - T_{Пл}) \pi D_{Пл} dx. \quad (3.94)$$

Так как $d\dot{G}_{Пл} = d\dot{G}_{\Pi-Пл} - d\dot{E}_{\text{вн}} + d\dot{D}_{\text{ос}}$, то (3.94) после дифференцирования можно переписать в виде

$$\frac{di_{Пл}^*}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left[(i_{\Pi}''^* - i_{Пл}^*) \frac{d\dot{G}_{\Pi-Пл}}{dx} + (i_K^* - i_{Пл}^*) \frac{d\dot{D}_{\text{ос}}}{dx} + \alpha_{\Pi-Пл} (T_{\Pi} - T_{Пл}) \pi D_{Пл} \right] \quad (3.95).$$

Складывая (3.89), (3.92) и (3.94), получим

$$d(\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}''^* + \dot{G}_K i_K^* + \dot{G}_{Пл} i_{Пл}^*) = 0, \quad \text{что и должно выполняться для адиабатического потока.}$$

Дифференцируя уравнение энергии для всего потока

$$\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}''^* + \dot{G}_K i_K^* + \dot{G}_{Пл} i_{Пл}^* = const$$

с учетом элементарных потоков масс, получим

$$\begin{aligned} \dot{G}_\Pi di_\Pi^{**} + \dot{G}_K di_K^* + \dot{G}_{\Pi\Lambda} di_{\Pi\Lambda}^* &= (i_\Pi^{**} - i_K^*) d\dot{G}_{\Pi-K} + (i_\Pi^{**} - i_{\Pi\Lambda}^*) d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} + \\ &+ (i_{\Pi\Lambda}^* - i_K^*) d\dot{E}_{\text{yH}} + (i_K^* - i_{\Pi\Lambda}^*) d\dot{D}_{\text{oc}}. \end{aligned} \quad (3.96)$$

Если отсутствует массообмен между фазами, срыв и выпадение жидкости в пленку, то будем иметь

$$\dot{G}_\Pi di_\Pi^{**} + \dot{G}_K di_K^* + \dot{G}_{\Pi\Lambda} di_{\Pi\Lambda}^* = 0. \quad (3.97)$$

Подставляя в (3.96) значения di_i^* из (3.91), (3.93) и (3.95) получим тождество $0=0$, что свидетельствует о правильности записи уравнений энергии для компонентов.

В некоторых струйных аппаратах, например в инжекторе, работающем на вскипающем потоке (он выполняет одновременно две функции - насоса и водоподогревателя), в камеру смешения входит неравновесный двухфазный поток, у которого $T_K > T_\Pi$, а $T_{\Pi\Lambda} < T_\Pi$. В этом случае уравнения энергии и потоков элементарных масс будут соответственно иметь вид:
для потока пара-

$$\begin{aligned} d(\dot{G}_\Pi i_\Pi^{**}) &= i_\Pi^{**} (T_K) d\dot{G}_{K-\Pi} - i_\Pi^{**} d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} + \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi) \pi D_K^2 n_V F_{\text{ПК}} dx - \\ &- \alpha_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_\Pi - T_{\Pi\Lambda}) dS_{\Pi\Lambda}, \end{aligned} \quad (3.98)$$

$$d\dot{G}_\Pi = d\dot{G}_{K-\Pi} - d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda}. \quad (3.99)$$

В окончательном виде можно написать:

$$\begin{aligned} \frac{di_\Pi^{**}}{dx} &= \frac{1}{\dot{G}_\Pi} \left[(i_\Pi^{**} (T_K) - i_\Pi^{**}) d\dot{G}_{K-\Pi} / dx + \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi) \pi D_K^2 n_V F_{\text{ПК}} - \right. \\ &\left. - \alpha_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_\Pi - T_{\Pi\Lambda}) \pi D_{\Pi\Lambda} \right]. \end{aligned} \quad (3.100)$$

Для капельного потока-

$$\begin{aligned} d(\dot{G}_K i_K^*) &= -i_\Pi^{**} (T_K) d\dot{G}_{K-\Pi} + i_{\Pi\Lambda}^* d\dot{E}_{\text{yH}} - i_K^* d\dot{D}_{\text{oc}} - \\ &- \alpha_{K-\Pi} (T_\Pi - T_K) \pi D_K^2 n_V F_{\text{ПК}} dx, \end{aligned} \quad (3.101)$$

$$d\dot{G}_K = d\dot{E}_{\text{yH}} - d\dot{D}_{\text{oc}} + d\dot{G}_{\Pi-K}, \quad (3.102)$$

$$\begin{aligned} \frac{di_K^*}{dx} &= \frac{1}{\dot{G}_K} \left[- (i_\Pi^{**} (T_K) - i_K^*) \frac{d\dot{G}_{K-\Pi}}{dx} - \right. \\ &\left. - (i_K^* - i_{\Pi\Lambda}^*) \frac{d\dot{E}_{\text{yH}}}{dx} - \alpha_{K-\Pi} (T_K - T_\Pi) \pi D_K^2 n_V F_{\text{ПК}} \right]. \end{aligned} \quad (3.103)$$

Для пленки-

$$d(\dot{G}_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^*) = i_\Pi^{**} d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} - i_{\Pi\Lambda}^* d\dot{E}_{\text{yH}} + i_K^* d\dot{D}_{\text{oc}} + \alpha_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_\Pi - T_{\Pi\Lambda}) \pi D_{\Pi\Lambda} dx, \quad (3.104)$$

$$d\dot{G}_{\Pi\Lambda} = d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda} - d\dot{E}_{\text{yH}} + d\dot{D}_{\text{oc}}, \quad (3.105)$$

$$\frac{di_{\Pi\Lambda}^*}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left[(i_{\Pi}^{''*} - i_{\Pi\Lambda}^*) \frac{d\dot{G}_{\Pi-\Pi\Lambda}}{dx} + (i_K^* - i_{\Pi\Lambda}^*) \frac{d\dot{D}_{OC}}{dx} + \alpha_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_{\Pi} - T_{\Pi\Lambda}) \pi D_{\Pi\Lambda} \right]. \quad (3.106)$$

Для несущей среды при нестационарном адиабатном течении и случая испаряющегося потока ($T_K > T_{\Pi}$, $T_{\Pi\Lambda} > T_{\Pi}$) будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) &= -\frac{\partial}{\partial x} (\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) dx + i_{\Pi}^{''*} (T_K) \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_V F_{\Pi K} dx + \\ &+ \tilde{\alpha}_{K-\Pi} (T_K - T_{\Pi}) \pi D_K^2 n_V F_{\Pi K} dx + i_{\Pi}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \pi D_{\Pi\Lambda} dx + \\ &+ \tilde{\alpha}_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_{\Pi} - T_{\Pi\Lambda}) \pi D_{\Pi\Lambda} dx, \end{aligned} \quad (3.107)$$

где $\tilde{\alpha}$ - коэффициент теплоотдачи.

Введем объемные доли $\alpha_i = \frac{dV_i}{dV}$, где $dV = dV_{\Pi} + dV_K + dV_{\Pi\Lambda}$, тогда

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) &= \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) dV, \quad \frac{\partial}{\partial x} (\dot{G}_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) dx = \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} w_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) dV, \\ i_{\Pi}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \pi D_{\Pi\Lambda} dx &= i_{\Pi}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} \frac{\pi D_{\Pi\Lambda}^2}{4} dx = \\ &= i_{\Pi}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) dV. \end{aligned}$$

Теперь уравнение (3.107) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi} w_{\Pi} i_{\Pi}^{''*}) &= i_{\Pi}^{''*} (T_K) \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_V + \\ &+ \tilde{\alpha}_{K-\Pi} (T_K - T_{\Pi}) \pi D_K^2 n_V + \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} i_{\Pi}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) + \\ &+ \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} \tilde{\alpha}_{\Pi-\Pi\Lambda} (T_{\Pi\Lambda} - T_{\Pi}) (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) \end{aligned} \quad (3.108)$$

Для капельного потока и пленки будем иметь соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_K \rho_K i_K^*) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_K \rho_K w_K i_K^*) &= -i_{\Pi}^{''*} (T_K) \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_V + \\ &+ \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} (i_{\Pi\Lambda}^* j_{\Pi\Lambda} - i_K^* j_{OC}) (\alpha_K + \alpha_{\Pi}) - \tilde{\alpha}_K (T_K - T_{\Pi}) \pi D_K^2 n_V, \end{aligned} \quad (3.109)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_{\Pi\Lambda} \rho_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^*) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha_{\Pi\Lambda} \rho_{\Pi\Lambda} w_{\Pi\Lambda} i_{\Pi\Lambda}^*) &= \\ &= \frac{4}{D_{\Pi\Lambda}} (1 - \alpha_{\Pi\Lambda}) (i_K^* j_{OC} - i_{\Pi\Lambda}^{''*} (T_{\Pi\Lambda}) j_{\Pi\Lambda-\Pi} - i_{\Pi\Lambda}^* j_{\Pi\Lambda} - \tilde{\alpha}_{\Pi\Lambda-\Pi} (T_{\Pi\Lambda} - T_{\Pi})) \end{aligned} \quad (3.110)$$

где $\alpha_{\Pi} + \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{Пл}} = 1$; $j_{\text{вн}} = d\dot{E}_{\text{вн}} / dS_{\text{Пл}} = d\dot{E}_{\text{вн}} / (\pi D_{\text{Пл}} dx)$; $j_{\text{ос}} = d\dot{D}_{\text{ос}} / (\pi D_{\text{Пл}} dx)$.

С целью обеспечения условий сохранения энергии и сплошности, при численном решении задач движения двухфазных адиабатного потоков, как правило, уравнения для всего потока записываются в интегральной форме, то есть $\dot{I}_{\text{CM}}^* = \text{const}$ и $\dot{G}_{\text{CM}} = \text{const}$.

Такой подход уменьшает погрешность вычислений, возникающую из-за замены дифференциальных уравнений уравнениями в конечно-разностной форме.

4. Дисперсное течение

4.1. Движение идеального газа с твердыми частицами в сопле Лаваля

Используя уравнения, полученные в разделе 3, можно написать:

$$\dot{G}_{\Gamma} dw_{\Gamma} = -f_{\Gamma} dp - D^* n_{\text{v}} F dx - \tau_w \pi D dx, \quad (4.1)$$

$$\dot{G}_{\text{к}} dw_{\text{к}} = -f_{\text{к}} dp + D^* n_{\text{v}} F dx, \quad (4.2)$$

$$\dot{G}_{\Gamma} di_{\Gamma}^* = \alpha (T_{\text{к}} - T_{\Gamma}) \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} F dx, \quad (4.3)$$

$$\dot{G}_{\text{к}} di_{\text{к}}^* = -\alpha (T_{\text{к}} - T_{\Gamma}) \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} F dx, \quad (4.4)$$

$$pv_{\Gamma} = R_{\Gamma} T_{\Gamma}, \quad (4.5)$$

где $c_x = 24/\text{Re}_{\text{к}} + 4,4/\sqrt{\text{Re}_{\text{к}}} + 0,32$; $\alpha = \left(2 + 0,6 \text{Re}_{\text{к}}^{0,5} \text{Pr}_{\Gamma}^{0,33}\right) \frac{\lambda_{\Gamma}}{D_{\text{к}}}$;

$\text{Re}_{\text{к}} = \frac{|w_{\Gamma} - w_{\text{к}}| D_{\text{к}} \rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}}$; $\tau_w = c_f \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2}$; $c_f = 0,079/\text{Re}_{\Gamma}^{0,25}$ [11];

$\dot{G}_{\Gamma} = w_{\Gamma} \rho_{\Gamma} f_{\Gamma}$; $\dot{G}_{\text{к}} = w_{\text{к}} \rho_{\text{к}} f_{\text{к}}$.

Для обратной задачи, когда, например, статическое давление газа изменяется вдоль сопла по закону

$p = p_0 / \left[\left(\frac{p_0}{p_{\text{CP}}} - 1 \right) \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right]$, систему уравнений (4.1)-(4.5) можно привести к виду:

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{2p_0 (p_0/p_{\text{CP}} - 1)x}{l^2 \left[\left(p_0/p_{\text{CP}} - 1 \right) \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right]^2}, \quad (4.6)$$

$$\frac{dw_{\Gamma}}{dx} = - \frac{1}{w_{\Gamma} \rho_{\Gamma}} \frac{dp}{dx} - \frac{6D^* u}{\pi D_{\text{к}}^3 w_{\text{к}} \rho_{\text{к}}} - \frac{\tau_w \pi D}{\dot{G}_{\Gamma}}, \quad (4.7)$$

$$\frac{dw_{\text{к}}}{dx} = - \frac{1}{w_{\text{к}} \rho_{\text{к}}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D^*}{\pi D_{\text{к}}^3 w_{\text{к}} \rho_{\text{к}}}, \quad (4.8)$$

$$\frac{dT_{\Gamma}}{dx} = \frac{6\alpha (T_{\text{к}} - T_{\Gamma}) u}{D_{\text{к}} \rho_{\text{к}} w_{\text{к}} c_{p\Gamma}} - \frac{w_{\Gamma} dw_{\Gamma}}{c_{p\Gamma} dx}, \quad (4.9)$$

$$\frac{dT_K}{dx} = \frac{6\alpha(T_K - T_\Gamma)}{D_K \rho_K w_K c_{pK}} - \frac{w_K dw_K}{c_{pK} dx}, \quad (4.10)$$

$$\frac{d\rho_\Gamma}{dx} = \rho_\Gamma \left(\frac{1}{p} \frac{dp}{dx} - \frac{1}{T_\Gamma} \frac{dT_\Gamma}{dx} \right), \quad (4.11)$$

$$F = \frac{\dot{G}_\Gamma}{w_\Gamma \rho_\Gamma} + \frac{\dot{G}_K}{w_K \rho_K}, \quad (4.12)$$

$$D = (4F/\pi)^{0,5}. \quad (4.13)$$

Здесь при выводе уравнений использовались зависимости:

$$\dot{G}_K = \dot{n} \pi D_K^3 \rho_K / 6; \quad n_v = \dot{n} / (F w_K); \quad u = \dot{G}_K / \dot{G}_\Gamma.$$

Получим систему уравнений для решения прямой задачи, когда задан закон изменения площади поперечного сечения канала вдоль продольной координаты.

Так как масса частиц при движении остается неизменной, а плотность постоянной, то можно написать

$$d\dot{G}_K = d(w_K \rho_K f_K) = \rho_K (w_K df_K + f_K dw_K) = 0, \text{ отсюда}$$

$$\frac{df_K}{dx} = -\frac{f_K}{w_K} \frac{dw_K}{dx}. \quad (4.14)$$

Для несущего потока $d\dot{G}_\Gamma = d(w_\Gamma \rho_\Gamma f_\Gamma) = 0$.

После дифференцирования уравнения сплошности газового потока разрешим его относительно $d\rho_\Gamma/dx$

$$\frac{d\rho_\Gamma}{dx} = -\frac{\rho_\Gamma}{f_\Gamma} \frac{df_\Gamma}{dx} - \frac{\rho_\Gamma}{w_\Gamma} \frac{dw_\Gamma}{dx}, \quad (4.15)$$

$$\text{но } \frac{dF}{dx} = \frac{df_\Gamma}{dx} + \frac{df_K}{dx}. \quad (4.16)$$

С учетом (4.14) и (4.16) перепишем (4.15) в виде

$$\frac{d\rho_\Gamma}{dx} = -\frac{\rho_\Gamma}{f_\Gamma} \frac{dF}{dx} - \frac{\rho_\Gamma f_K}{f_\Gamma w_K} \frac{dw_K}{dx} - \frac{\rho_\Gamma}{w_\Gamma} \frac{dw_\Gamma}{dx}. \quad (4.17)$$

Подставляя значения dw_Γ/dx и dw_K/dx из (4.7) и (4.8) в (4.17), получим

$$\frac{d\rho_\Gamma}{dx} = -\frac{\rho_\Gamma}{f_\Gamma} \frac{dF}{dx} + \frac{\rho_\Gamma f_K}{\rho_K f_\Gamma w_K^2} \frac{dp}{dx} - \frac{6\rho_\Gamma f_K D^*}{\rho_K f_\Gamma w_K^2 \pi D_K^3} + \frac{1}{w_\Gamma^2} \frac{dp}{dx} +$$

$$+ \frac{6\rho_\Gamma D^* u}{\rho_K w_\Gamma w_K \pi D_K^3} + \frac{\tau_w \pi D}{w_\Gamma^2 f_\Gamma}. \quad (4.18)$$

Используя уравнение состояния (4.11), с учетом (4.7) и (4.9) найдем, что

$$\frac{d\rho_\Gamma}{dx} = \frac{\rho_\Gamma}{p} \frac{dp}{dx} - \frac{6\rho_\Gamma \alpha (T_K - T_\Gamma) u}{T_\Gamma D_K \rho_K w_K c_{p\Gamma}} - \frac{1}{T_\Gamma c_{p\Gamma}} \frac{dp}{dx} - \frac{6\rho_\Gamma w_\Gamma D^* u}{\rho_K w_K T_\Gamma c_{p\Gamma} \pi D_K^3} - \frac{\tau_w \pi D}{T_\Gamma c_{p\Gamma} f_\Gamma} \quad (4.19)$$

Приравнявая (4.18) и (4.19), определим градиент статического давления вдоль сопла

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{\left(M_{\Gamma}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma}} \left(\frac{w_{\Gamma}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_K} \right)^2 - 1 \right)} \left[\frac{6\rho_{\Gamma} D^* w_{\Gamma}^2}{\pi D_K^3 \rho_K w_K^2} (u(k_{\Gamma} - 1)M_{\Gamma}^2 \frac{w_K}{w_{\Gamma}} + u \frac{w_K}{w_{\Gamma}} - \frac{f_K}{f_{\Gamma}}) + \right. \\ \left. + \frac{\tau_w \pi D}{f_{\Gamma}} (1 + (k_{\Gamma} - 1)M_{\Gamma}^2) - \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{f_{\Gamma}} \frac{dF}{dx} + \frac{6\rho_{\Gamma} \alpha (T_K - T_{\Gamma}) u (k_{\Gamma} - 1) M_{\Gamma}^2}{D_K \rho_K w_K} \right]. \quad (4.20)$$

где $M_{\Gamma} = \frac{w_{\Gamma}}{a_{\Gamma}}$; $a_{\Gamma} = \sqrt{\frac{k_{\Gamma} p}{\rho_{\Gamma}}}$; $k_{\Gamma} = \frac{c_{p\Gamma}}{c_{v\Gamma}}$; $c_{p\Gamma} = \frac{a^2}{(k_{\Gamma} - 1)T_{\Gamma}}$.

Как видим (см. 4.20), на величину dp/dx влияют соответственно сила сопротивления капель, сила трения, геометрия канала и теплоотдача между потоком и частицами, причем указанные воздействия определяются знаком главного определителя системы

$$\Delta_C = \left(M_{\Gamma}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma}} \left(\frac{w_{\Gamma}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_K} \right)^2 - 1 \right).$$

Зная dp/dx , по формулам (4.7)-(4.11) вычислим соответствующие производные, а затем и искомые величины: $p, w_{\Gamma}, w_K, T_{\Gamma}, T_K, \rho_{\Gamma}$. Эффективность сопла, работающего на газе с твердыми частицами, определим как отношение кинетической энергии двухфазного потока на срезе сопла к кинетической энергии гомогенной смеси при изоэнтروпийном расширении

$$\eta_C = \frac{w_{\Gamma CP}^2 + u w_{KCP}^2}{2(1+u) \frac{w_{CP}^2}{2}} = \frac{w_{\Gamma CP}^2 + u w_{KCP}^2}{2(1+u) c_{pCM} T_{CM0}^* \left(1 - \frac{T_{CM}}{T_{CM0}^*} \right)} = \frac{w_{\Gamma CP}^2 + u w_{KCP}^2}{2(1+u) c_{pCM} T_{CM0}^* \left(1 - \left(\frac{p_{CP}}{p_0} \right)^{\frac{k_{CM}-1}{k_{CM}}} \right)},$$

где $c_{pCM} = g_{\Gamma} c_{p\Gamma} + g_K c_{pK}$; $g_i = \dot{G}_i / \dot{G}_{CM}$; $\dot{G}_{CM} = \dot{G}_{\Gamma} + \dot{G}_K$;

$$g_{\Gamma} = 1/(1+u); \quad g_K = u/(1+u); \quad p_0^* = p_0 \left(\frac{T_0^*}{T_0} \right)_{CM}^{\frac{k_{CM}}{k_{CM}-1}};$$

$$T_{CM0} = (g_{\Gamma} c_{p\Gamma} T_{\Gamma 0} + g_K c_{pK} T_{K0}) / c_{pCM}; \quad T_{CM0}^* = T_{CM0} + \frac{w_{CM0}^2}{2c_{pCM}}; \quad w_{CM0} = \sqrt{\frac{w_{\Gamma 0}^2 + u w_{K0}^2}{1+u}};$$

$$k_{CM} = \frac{c_{p\Gamma} + u c_{pK}}{c_{v\Gamma} + u c_{vK}}.$$

Получим выражение показателя изоэнтропы для гомогенного потока. Для обратимого процесса приращение энтропии системы газ-частицы равно нулю

$$d\dot{S}_C = d\dot{S}_\Gamma + d\dot{S}_K = 0, \text{ где } d\dot{S}_\Gamma = \dot{G}_\Gamma \left(c_{v\Gamma} \frac{dT_\Gamma}{T_\Gamma} + R_\Gamma \frac{dv_\Gamma}{v_\Gamma} \right); d\dot{S}_K = \dot{G}_K c_{pK} \frac{dT_K}{T_K}.$$

Вводя понятие коэффициента загрузки потока частицами $u = \dot{G}_K / \dot{G}_\Gamma$ и считая теплообмен обратимым (т.е. $T_K = T_\Gamma$), из условия $d\dot{S}_C = 0$ имеем

$$c_{v\Gamma} \ln \frac{T_2}{T_1} + R_\Gamma \ln \frac{v_{\Gamma 2}}{v_{\Gamma 1}} - u c_{pK} \ln \frac{T_2}{T_1} = 0, \text{ или } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_{\Gamma 1}}{v_{\Gamma 2}} \right)^{\frac{R_\Gamma}{c_{v\Gamma} - u c_{pK}}}, \text{ но с другой стороны,}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_{\Gamma 1}}{v_{\Gamma 2}} \right)^{k-1}.$$

Приравнявая показатели степени, найдем $k_{CM} = \frac{c_{p\Gamma} - u c_{pK}}{c_{v\Gamma} - u c_{pK}}$.

Из полученного выражения видно, что с увеличением загрузки потока частицами $k_{CM} \rightarrow 1$, т.е. процесс будет стремиться к изотермическому; при $u \rightarrow 0$ - к изоэнтальпийному, так как $k_{CM} \rightarrow c_{p\Gamma} / c_{v\Gamma}$.

Решение полученных систем уравнений реализовано соответственно в программах LAV2A и LAV2B (см. приложение №3). Результаты расчетов представлены на рис.4.1 и 4.2.

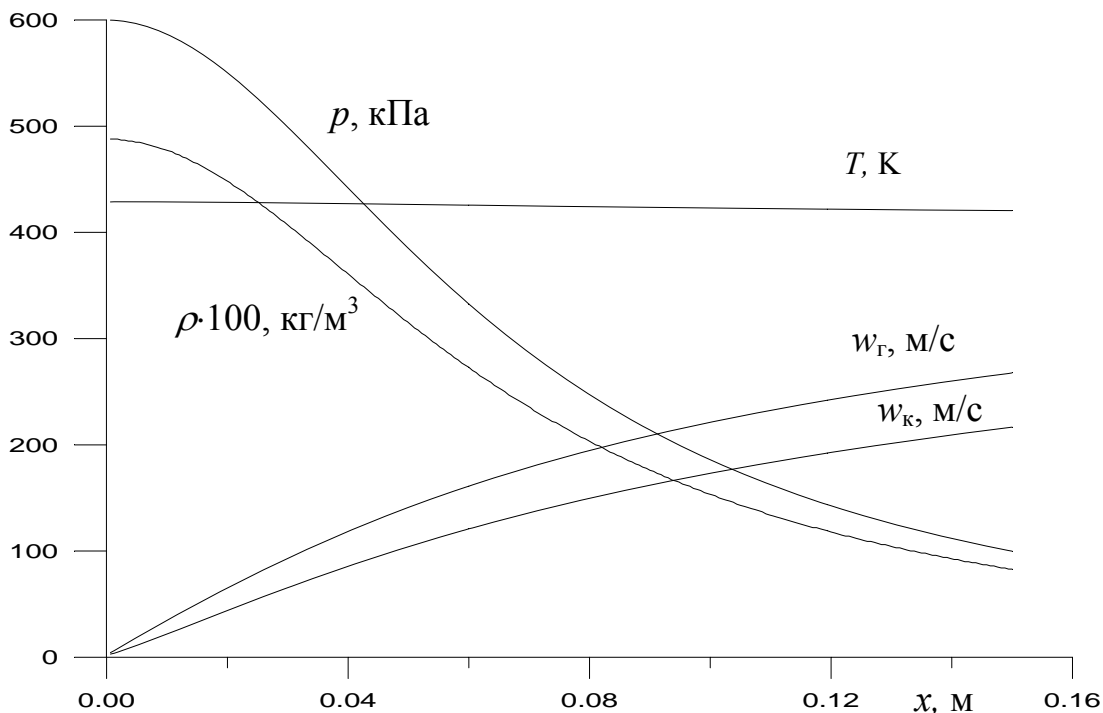


Рис. 4.1 Ход кривых основных физических величин вдоль сопла Лавала (LAV2A)

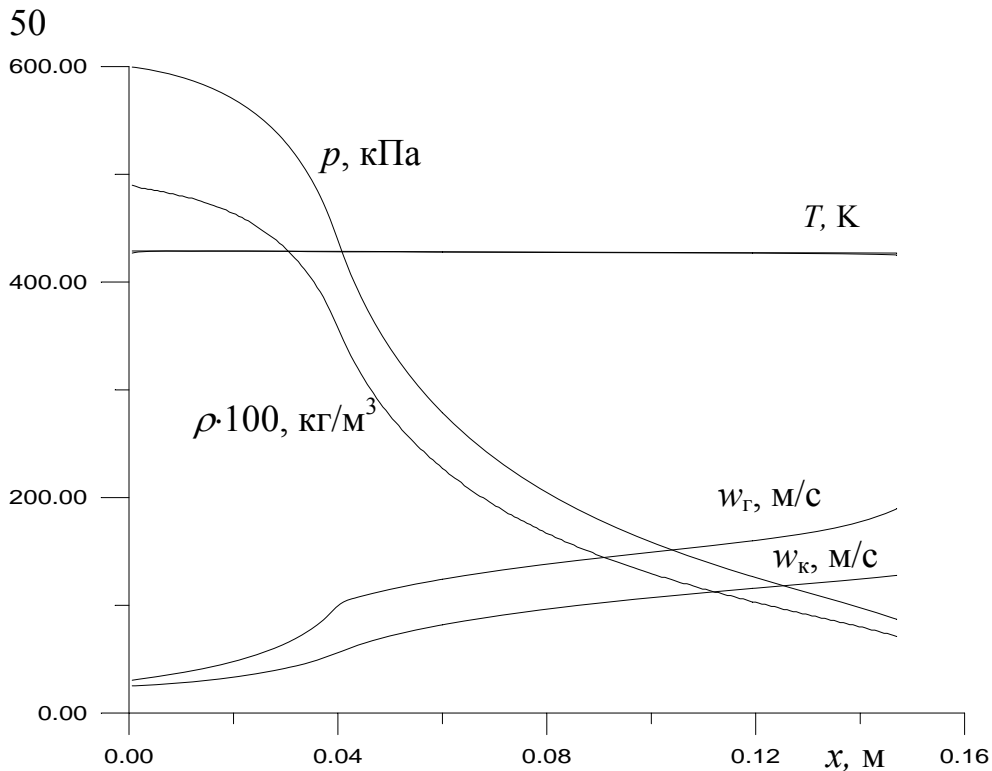


Рис. 4.2 Распределение основных величин по длине сопла Лавеля (LAV2B)

4.2. Расчет сопла Лавеля, работающего на идеальном газе с испаряющимися каплями

Предлагаемый расчет является более общим случаем, так как здесь учитывается не только теплоотдача от капель, но и их испарение, которое приводит к изменению как физических свойств несущего потока, так и энергетических характеристик сопла.

Из курса “Теория тепло- и массообмена” известно, что плотность потока массы пара, покидающего поверхность длиной l , определяется по формуле

$$j_{\Pi} = \bar{\beta}(c_{\text{ип}} - c_{\infty\Pi}) = \frac{\bar{\beta}}{R_{\Pi}} \left(\frac{p_{\Pi W}}{T_{\Pi W}} - \frac{p_{\Pi\infty}}{T_{\Pi\infty}} \right), \quad \text{где } \bar{\beta} = \frac{1}{l} \int_0^l \beta(x) dx - \text{средний коэффициент}$$

массоотдачи; $R_{\Pi} = R_0 / \mu_{\Pi}$; $p_{\Pi W}$, $p_{\Pi\infty}$ - парциальные давления пара испаряющегося вещества на поверхности и на бесконечности соответственно.

Средний коэффициент массоотдачи при обтекании газом капли находится из критериального уравнения

$$Sh = 2 + A Re^m Sc^n, \quad (4.21)$$

где $Sh = \bar{\beta} l / D_{\text{всф}}$ - критерий Шервуда; $Re = w_{\Gamma\infty} l / \nu_{\Gamma\infty}$; $Sc = \nu_{\Gamma\infty} / D_{\text{всф}}$ - критерий

Шмидта; $A=0,6$; $m=0,5$; $n=0,33$; $D_{\text{всф}} = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \frac{p_0}{p}$ - коэффициент диффузии;

$D_0 = 22 \cdot 10^{-6}$ - коэффициент диффузии (водяной пар-воздух) при нормальных условиях ($T_0 = 273\text{K}$, $p_0 = 1,0133 \cdot 10^5 \text{Па}$), м²/с; $n = 1,5 \dots 2,5$.

Для нашего случая поток массы пара от капель, находящихся в элементарном объеме Fdx , найдем из выражения

$$d\dot{G}_\Pi = j_{\kappa-\Pi} \pi D_\kappa^2 n_v F dx = 6 j_{\kappa-\Pi} \frac{\dot{G}_\kappa}{w_\kappa \rho_\kappa D_\kappa} dx.$$

При определении коэффициента массоотдачи от капель ($\bar{\beta}$) необходимо в критериальное уравнение (4.21) подставлять $Re_\kappa = |w_{\Gamma\Pi} - w_\kappa| D_\kappa \rho_{\Gamma\Pi} / \tilde{\mu}_{\Gamma\Pi}$, где $\tilde{\mu}_{\Gamma\Pi}$ - коэффициент динамической вязкости газопаровой смеси, который будем считать равным коэффициенту динамической вязкости воздуха ($\tilde{\mu}_\Gamma$), что справедливо при незначительной концентрации пара в газе.

Наличие массотдачи от капель и скольжения между фазами приводит, как отмечалось выше, к появлению силы Мещерского $(w_{\Gamma-\Pi} - w_\kappa) \pi D_\kappa^2 n_v j_{\kappa-\Pi} F dx$ в уравнении движения несущего потока.

Выражение $di_{\Gamma\Pi}^*$ и $dT_{\Gamma\Pi}$ для газопаровой смеси найдем после дифференцирования уравнения энергии всего потока (газ, пар, капли), движущегося в адиабатическом канале.

$$\begin{aligned} \dot{G}_\Gamma i_\Gamma^* + \dot{G}_\kappa i_\kappa^* + \dot{G}_\Pi i_\Pi^{**} &= const, \\ \dot{G}_\Gamma di_\Gamma^* + \dot{G}_\kappa di_\kappa^* + i_\kappa^* d\dot{G}_\kappa + \dot{G}_\Pi di_\Pi^{**} + i_\Pi^{**} d\dot{G}_\Pi &= 0, \end{aligned}$$

но $d\dot{G}_\Pi = -d\dot{G}_\kappa$, тогда

$$\dot{G}_\Gamma di_\Gamma^* + \dot{G}_\Pi di_\Pi^{**} = -(\dot{G}_\kappa di_\kappa^* + (i_\Pi^{**} - i_\kappa^*) d\dot{G}_\Pi). \quad (4.22)$$

Рассмотрим левую часть уравнения

$$\dot{G}_\Pi d\left(i_\Pi^{**} + \frac{w_\Pi^2}{2}\right) + \dot{G}_\Gamma d\left(i_\Gamma^* + \frac{w_\Gamma^2}{2}\right) = \dot{G}_\Pi (c_{p\Pi} dT_\Pi + w_\Pi dw_\Pi) + \dot{G}_\Gamma (c_{p\Gamma} dT_\Gamma + w_\Gamma dw_\Gamma) \quad \text{Так как}$$

$T_\Gamma = T_\Pi = T_{\Gamma\Pi}$, а $w_\Gamma = w_\Pi = w_{\Gamma\Pi}$, то

$$\begin{aligned} \dot{G}_\Pi di_\Pi^{**} + \dot{G}_\Gamma di_\Gamma^* &= (\dot{G}_\Pi c_{p\Pi} + \dot{G}_\Gamma c_{p\Gamma}) dT_{\Gamma\Pi} + \dot{G}_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi} dw_{\Gamma\Pi} = \\ &= \dot{G}_{\Gamma\Pi} (w_{\Gamma\Pi} dw_{\Gamma\Pi} + c_{p\Gamma\Pi} dT_{\Gamma\Pi}) = \dot{G}_{\Gamma\Pi} di_{\Gamma\Pi}^*, \end{aligned}$$

где $\dot{G}_{\Gamma\Pi} = \dot{G}_\Gamma + \dot{G}_\Pi$.

Возвращаясь к (4.22), получим:

$$\begin{aligned} di_{\Gamma\Pi}^* &= -[(i_\Pi^{**} - i_\kappa^*) d\dot{G}_\Pi + \dot{G}_\kappa di_\kappa^*] / \dot{G}_{\Gamma\Pi}, \\ dT_{\Gamma\Pi} &= -[(i_\Pi^{**} - i_\kappa^*) d\dot{G}_\Pi + \dot{G}_\kappa di_\kappa^*] / (c_{p\Gamma\Pi} \dot{G}_{\Gamma\Pi}) - w_{\Gamma\Pi} dw_{\Gamma\Pi} / c_{p\Gamma\Pi}, \end{aligned}$$

где $c_{p\Gamma\Pi} = (\dot{G}_\Gamma c_{p\Gamma} + \dot{G}_\Pi c_{p\Pi}) / \dot{G}_{\Gamma\Pi}$ - удельная изобарная теплоемкость газопаровой смеси.

Ниже приводится система уравнений, позволяющая выполнить расчет сопла Лавала на основе обратной задачи (задан закон изменения статического давления вдоль продольной оси сопла, см. программу LAV3).

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{2p_0(p_0/p_{CP} - 1)x}{l^2 \left[(p_0/p_{CP} - 1) \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right]^2}, \quad (4.23)$$

$$\frac{d\dot{G}_\Pi}{dx} = \pi D_\kappa^2 j_{\kappa-\Pi} n_v F_C = \frac{6\dot{G}_\kappa j_{\kappa-\Pi}}{D_\kappa \rho_\kappa w_\kappa}, \quad (4.24)$$

$$\frac{dD_K}{dx} = -\frac{2j_{K-\Pi}}{\rho_K w_K}, \quad (4.25)$$

$$\frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} = -\left[\frac{\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{w_{\Gamma\Pi} \rho_{\Gamma\Pi}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D^* \dot{G}_K}{w_K \pi D_K^3 \rho_K} + \tau_w \pi D_C + (w_{\Gamma\Pi} - w_K) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} \right] / \dot{G}_{\Gamma\Pi}, \quad (4.26)$$

$$\frac{dw_K}{dx} = -\frac{1}{w_K \rho_K} \frac{dp}{dx} + \frac{6D^*}{w_K \pi D_K^3 \rho_K}, \quad (4.27)$$

$$\frac{di_K^*}{dx} = -\left[(i_K^{**} - i_K^*) j_{K-\Pi} + \alpha (T_K - T_{\Gamma\Pi}) \right] \frac{\pi D_K^2 n_v F_C}{\dot{G}_K}, \quad (4.28)$$

$$\frac{dT_K}{dx} = \left(\frac{di_K^*}{dx} - w_K \frac{dw_K}{dx} \right) / c_{pK} \quad (4.29)$$

$$\frac{dT_{\Gamma\Pi}}{dx} = -\left[(i_{\Pi}^{**} - i_K^*) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} + \dot{G}_K \frac{di_K^*}{dx} \right] / (c_{p\Pi} \dot{G}_{\Gamma\Pi}) - \frac{w_{\Gamma\Pi}}{c_{p\Pi}} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx}, \quad (4.30)$$

$$\frac{d\rho_{\Gamma\Pi}}{dx} = \left(\frac{dp}{dx} - \frac{p}{T_{\Gamma\Pi}} \frac{dT_{\Gamma\Pi}}{dx} \right) / (R_{\Gamma\Pi} T_{\Gamma\Pi}), \quad (4.31)$$

где $\dot{G}_{\Gamma\Pi} = \dot{G}_{\Gamma 0} + \dot{G}_{\Pi}$; $\dot{G}_K = \dot{G}_{\Pi 0} + \dot{G}_{K 0} - \dot{G}_{\Pi}$; $\mu_{\Gamma\Pi} = \dot{G}_{\Gamma\Pi} \mu_{\Pi} \mu_{\Gamma} / (\dot{G}_{\Pi} \mu_{\Gamma} + \dot{G}_{\Gamma} \mu_{\Pi})$;
 $p_{\Pi} = \dot{G}_{\Pi} \mu_{\Gamma\Pi} p_{\Gamma\Pi} / (\dot{G}_{\Gamma\Pi} \mu_{\Pi})$ - парциальное давление пара в газопаровой смеси;
 $R_{\Gamma\Pi} = R_0 (\dot{G}_{\Gamma 0} / \mu_{\Gamma} + \dot{G}_{\Pi} / \mu_{\Pi}) / \dot{G}_{\Gamma\Pi}$; $c_{p\Pi} = (c_{p\Gamma} \dot{G}_{\Gamma} + c_{p\Pi} \dot{G}_{\Pi}) / \dot{G}_{\Gamma\Pi}$; $p_{\Pi S} = f(T_K)$;
 $\tilde{\mu}_{\Gamma} = 17,2 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-6} (T_{\Gamma\Pi} - 273) - 0,03 \cdot 10^{-9} (T_{\Gamma\Pi} - 273)^2$;
 $\lambda_{\Gamma} = 23,8 \cdot 10^{-3} + 8,4189 \cdot 10^{-5} (T_{\Gamma\Pi} - 273) - 4,2908 \cdot 10^{-8} (T_{\Gamma\Pi} - 273)^2$;
 $i_{\Pi}^{**} = [2501 + 2,04 \cdot (T_{\Gamma\Pi} - 273) - 29 \cdot 10^{-4} (T_{\Gamma\Pi} - 273)^2] \cdot 10^3$;
 $\rho_K = 999,9 - 0,1475 (T_K - 273) - 2,695 \cdot 10^{-3} (T_K - 273)^2$; $Re_K = |w_{\Gamma\Pi} - w_K| D_K \rho_{\Gamma\Pi} / \tilde{\mu}$;
 $D_{\text{БсФ}} = D_0 (T_{\Gamma\Pi} / T_0)^n (p_0 / p_{\Gamma\Pi})$; $Sc = \tilde{\mu}_{\Gamma} / (\rho_{\Gamma\Pi} D_{\text{БсФ}})$; $\beta = (2 + 0,6 Re_K^{0,5} Sc^{0,33}) D_{\text{БсФ}} / D_K$;
 $j_{K-\Pi} = \beta \mu_{\Pi} (p_{\Pi S} / T_K - p_{\Pi} / T_{\Gamma\Pi}) / R_0$; $c_x = 24 / Re_K + 4,4 / Re_K^{0,5} + 0,32$;
 $D^* = c_x \pi D_K^2 \rho_{\Gamma\Pi} |w_{\Gamma\Pi} - w_K| (w_{\Gamma\Pi} - w_K) / 8$; $Re_{\Gamma\Pi} = w_{\Gamma\Pi} D_C \rho_{\Gamma\Pi} / \tilde{\mu}_{\Gamma\Pi}$; $c_f = 0,079 / Re_{\Gamma\Pi}^{0,25}$;
 $\tau_w = c_f \rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}^2 / 2$; $Pr = \tilde{\mu}_{\Gamma} c_{p\Pi} / \lambda_{\Gamma}$; $\alpha = (2 + 0,6 Re_K^{0,5} Pr^{0,33}) \lambda_{\Gamma} / D_K$;
 $F_C = \dot{G}_K / (w_K \rho_K) + \dot{G}_{\Gamma\Pi} / (w_{\Gamma\Pi} \rho_{\Gamma\Pi})$; $D_C = \sqrt{4F_C / \pi}$.

Рассмотрим прямую задачу. Как отмечалось выше, в этом случае, когда задан закон $F_c = f(x)$, необходимо найти градиент статического давления вдоль продольной оси канала, то есть разрешить систему уравнений (4.24)-(4.31), включая уравнение сплошности $\dot{G}_{CM} = w_{\Gamma\Pi} \rho_{\Gamma\Pi} f_{\Gamma\Pi} + w_K \rho_K f_K$, относительно dp/dx .

Найдем dp/dx . Дифференцируя уравнение сплошности и полагая $\rho_K = const$, получим

$$df_{\Gamma\Pi} + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{\rho_{\Gamma\Pi}} d\rho_{\Gamma\Pi} + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{w_{\Gamma\Pi}} dw_{\Gamma\Pi} + \frac{\rho_K f_K}{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} dw_K + \frac{\rho_K w_K}{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} df_K = 0, \quad (4.32)$$

$$\text{но } f_{\Gamma\Pi} = F_C - f_K, \quad (4.33)$$

$$\text{а } \dot{G}_K = w_K \rho_K f_K = \frac{\pi D_K^3}{6} \rho_K \dot{n}. \quad (4.34)$$

Дифференцируя (4.33) и (4.34) и подставляя $df_{\Gamma\Pi} = dF_C - df_K$ и $df_K = \frac{\pi D_K^2}{2w_K} \dot{n} dD_K - \frac{f_K}{w_K} dw_K$ в (4.32), будем иметь

$$\left(\frac{\rho_K \pi D_K^2 \dot{n}}{2\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} - \frac{\pi D_K^2 \dot{n}}{2w_K} \right) dD_K + \frac{f_K}{w_K} dw_K + dF_C + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{\rho_{\Gamma\Pi}} d\rho_{\Gamma\Pi} + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{w_{\Gamma\Pi}} dw_{\Gamma\Pi} = 0. \quad (4.35)$$

Слагаемое $\frac{f_{\Gamma\Pi}}{\rho_{\Gamma\Pi}} d\rho_{\Gamma\Pi}$ в (4.35) с учетом (4.31), (4.30) и (4.28) представим в виде

$$\begin{aligned} \frac{f_{\Gamma\Pi}}{\rho_{\Gamma\Pi}} \frac{d\rho_{\Gamma\Pi}}{dx} &= \frac{f_{\Gamma\Pi}}{p} \frac{dp}{dx} - \frac{(i^{**}(T_K) - i_{\Pi}^{**}) f_{\Gamma\Pi}}{T_{\Gamma\Pi} c_{p_{\Gamma\Pi}} \dot{G}_{\Gamma\Pi}} \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} - \\ &- \frac{\alpha \Delta T f_{\Gamma\Pi} \pi D_K^2 n_v F_C}{T_{\Gamma\Pi} c_{p_{\Gamma\Pi}} \dot{G}_{\Gamma\Pi}} + \frac{f_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}}{T_{\Gamma\Pi} c_{p_{\Gamma\Pi}}} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx}, \end{aligned} \quad (4.36)$$

где $\frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} = \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_v F_C$.

Выражение $\left(\frac{\rho_K \pi D_K^2 \dot{n}}{2\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} - \frac{\pi D_K^2 \dot{n}}{2w_K} \right) dD_K$ в (4.35), учитывая, что

$\frac{dD_K}{dx} = -\frac{2}{\rho_K \pi D_K^2 \dot{n}} \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx}$, перепишем так:

$$-\left(\frac{1}{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} - \frac{1}{\rho_K w_K} \right) \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx}. \quad (4.37)$$

Подставляя (4.36) и (4.37) в (4.35), найдем

$$\begin{aligned} \frac{dF_C}{dx} + \frac{f_K}{w_K} \frac{dw_K}{dx} + \left(\frac{f_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}}{T_{\Gamma\Pi} c_{p_{\Gamma\Pi}}} + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{w_{\Gamma\Pi}} \right) \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{p} \frac{dp}{dx} - \\ - \frac{(i^{**}(T_K) - i_{\Pi}^{**}) f_{\Gamma\Pi}}{T_{\Gamma\Pi} c_{p_{\Gamma\Pi}} \dot{G}_{\Gamma\Pi}} \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} - \frac{\alpha \Delta T \pi D_K^2 f_{\Gamma\Pi} \dot{n}}{c_{p_{\Gamma\Pi}} T_{\Gamma\Pi} \dot{G}_{\Gamma\Pi} w_K} - \left(\frac{1}{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} - \frac{1}{\rho_K w_K} \right) \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} = 0, \end{aligned} \quad (4.38)$$

где $\dot{n} = n_v F_C w_K$.

Преобразуем (4.38), используя (4.26) и (4.27) к виду

$$\begin{aligned} \frac{f_{\Gamma\Pi}}{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}^2} \left(M_{\Gamma\Pi}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left(\frac{w_{\Gamma\Pi}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma\Pi}}{\rho_K} \right)^2 - 1 \right) \frac{dp}{dx} = \frac{6D^*}{\pi D_K^3 \rho_K w_K} \times \\ \times \left[\frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \frac{f_{\Gamma\Pi}}{w_{\Gamma\Pi}} \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) - \frac{f_K}{w_K} \right] + \frac{\tau_w \pi D_C f_{\Gamma\Pi}}{\dot{G}_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}} \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) + \\ + \frac{f_{\Gamma\Pi}}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left[\frac{(i^{**}(T_K) - i_{\Pi}^{**}) (k_{\Gamma\Pi} - 1)}{a_{\Gamma\Pi}^2} + \frac{\Delta w}{w_{\Gamma\Pi}} \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) - \right. \\ \left. - \frac{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}}{\rho_K w_K} + 1 \right] \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} + \frac{\alpha \Delta T \pi D_K^2 \dot{n} (k_{\Gamma\Pi} - 1)}{a_{\Gamma\Pi}^2 w_K w_{\Gamma\Pi} \rho_{\Gamma\Pi}} - \frac{dF_C}{dx}, \end{aligned} \quad (4.39)$$

где $\frac{\rho_{\Gamma\Pi}}{p} = \frac{k_{\Gamma\Pi}}{a_{\Gamma\Pi}^2}$; $c_{\rho_{\Gamma\Pi}} T_{\Gamma\Pi} = a_{\Gamma\Pi}^2 / (k_{\Gamma\Pi} - 1)$; $\Delta w = w_{\Gamma\Pi} - w_K$.

Отметим, чтобы получить (4.39), необходимо выполнить утомительные преобразования!

Разрешая (4.39) относительно dp/dx , окончательно можно написать

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} = & \frac{1}{\left(M_{\Gamma\Pi}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left(\frac{w_{\Gamma\Pi}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma\Pi}}{\rho_K} \right)^2 - 1 \right)} \left\{ \frac{6D^* \rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}}{\pi D_K^3 \rho_K w_K} \times \right. \\ & \times \left[\frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) - \frac{f_K w_{\Gamma\Pi}}{f_{\Gamma\Pi} w_K} \right] + \tau_w \pi D_C \rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi} \times \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) / \dot{G}_{\Gamma\Pi} + \\ & + \frac{\alpha \Delta T \pi D_K^2 \dot{n} (k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 \rho_{\Gamma\Pi}}{w_K \dot{G}_{\Gamma\Pi}} + \left[\frac{(i_K^{**}(T_K) - i_{\Pi}^{**})(k_{\Gamma\Pi} - 1)}{a_{\Gamma\Pi}^2} + \frac{\Delta w}{w_{\Gamma\Pi}} \left((k_{\Gamma\Pi} - 1) M_{\Gamma\Pi}^2 + 1 \right) - \right. \\ & \left. \left. - \frac{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}}{\rho_K w_K} + 1 \right] \frac{\pi D_K^2 j_{K-\Pi} \dot{n} \rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}^2}{w_K \dot{G}_{\Gamma\Pi}} - \frac{\rho_{\Gamma\Pi} w_{\Gamma\Pi}^2}{f_{\Gamma\Pi}} \frac{dF_C}{dx} \right\}, \end{aligned} \quad (4.40)$$

где $\dot{n} = 6\dot{G}_{K0} / (\rho_{K0} \pi D_{K0}^3)$ - число капель в единицу времени (поток капель), 1/с.

Первое слагаемое в правой части уравнения (4.40) учитывает сопротивление капель, второе - силу трения между парогазовым потоком и стенками канала, третье - теплоотдачу от капель к потоку, четвертое - характеризует эффекты, связанные с массопереносом, пятое - воздействие геометрии канала на поток.

Если, например, течение дозвуковое, то есть

$$M_{\Gamma\Pi}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left(\frac{w_{\Gamma\Pi}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma\Pi}}{\rho_K} \right)^2 - 1 < 0, \text{ то все воздействия на поток при } dF_C/dx < 0,$$

как видно из (4.40), будут приводить к падению dp/dx .

Используя уравнения (4.40), (4.24)-(4.31) и $F_C=f(x)$, можно определить значения основных физических величин вдоль канала. Приведенные выше уравнения реализованы в программе LAV3B, представленной в приложении №3, где приводятся текст программы и результаты расчета в виде таблицы.

4.3 Высоковлажный поток

Под высоковлажным потоком будем понимать такой поток, у которого степень сухости несколько больше граничной, при которой в процессе расширения происходит переход пузырьковой структуры в капельно-паровую. Так, например, граничная степень сухости пара

$$x_{\Gamma\Pi} = \dot{G}_{\Pi} / (\dot{G}_{\Pi} + \dot{G}_{ж}) = \frac{\left(\frac{1}{1 - \pi\sqrt{2}/6} - 1 \right)}{\rho_{жс} / \rho_{\Pi} - 1} \text{ при температуре } t_s=150\text{C равна } 7,95 \cdot 10^{-3}.$$

Однако все уравнения, полученные для такого потока, справедливы для капельно-паровых потоков с низким влагосодержанием. Особенность расчета высоковлажного потока заключается в том, что здесь необходимо учитывать нестационарный характер охлаждения капель. Неучет этого обстоятельства приводит, как показывают расчеты, к завышению энергетических характеристик сопел, работающих на вскипающих и высоковлажных потоках, особенно при наличии в них крупнодисперсной влаги ($D_k=4...8\cdot 10^{-5}$ м), по сравнению с опытными данными.

Экспериментальные исследования таких потоков показывают, кроме того, что длина расширяющейся части сопла, при прочих равных условиях, влияет на коэффициент полезного действия сопла ($\eta_c=\varphi_c^2$), где φ_c - коэффициент скорости сопла. У коротких сопел ($l_{pc}/d_r=6$, где l_{pc} -длина расширяющейся части сопла) поток на срезе имеет значительную термическую неравновесность, при этом температура капель превышает температуру пара на 30 и более градусов, что приводит к значительной потере располагаемого перепада энтальпии. Такие сопла малоэффективны ($\varphi_c\approx 0,45...0,5$) и работают с большим шумом, так как в этом случае взрывной распад капель происходит вне сопла. При значительной длине ($l_{pc}/d_r\geq 50$) начинают сказываться силы трения и эффективность падает, то есть существует оптимальная длина. Для одного из режимов ($p_0^*=0,5$ МПа, $T_0^*=420$ К, $p_{oc}=0,1$ МПа) нами получено оптимальное отношение $(l_{pc}/d_r)_{opt}\approx 38$ при $\varphi_c\approx 0,8$, где l_{pc} - длина расширяющейся части сопла.

Таким образом, здесь в отличие от сопел, работающих на газовых средах, длина сопла при безотрывном течении оказывает существенное влияние на КПД, так как время нахождения жидкой фазы в канале определяет степень завершенности фазовых переходов.

Вернемся к вопросу нестационарного охлаждения капель. Для газовых потоков, несущих испаряющиеся капли, при определении коэффициента теплоотдачи от капель используется зависимость

$$\alpha_{(к-г)} = (2 + C \operatorname{Re}_k^m \operatorname{Pr}_g^n) \frac{\lambda_g}{D_k} \quad (4.41)$$

и в большинстве случаев выполняется условие $Bi\leq 0,1$ (напомним, что критерий $Bi_k=(D_k/(2\lambda_k))/(1/\alpha)$ является определяющим и характеризует соотношение между внутренним и внешним термическими сопротивлениями), что позволяет считать температуру в центре и на поверхности капли одинаковой. Однако при испарении жидкости в собственный пар коэффициент теплоотдачи на границе раздела находят по формуле [12].

$$\alpha_{(к-п)} = \frac{\kappa_{конд} r^2}{T_s (v'' - v') \sqrt{2\pi R_{п} T_s}}, \quad (4.42)$$

где $\kappa_{конд}=35/p_s^{0,56}$ - коэффициент конденсации. Если предположить, что коэффициент конденсации равен коэффициенту испарения, то для паро-капельных потоков даже с мелкодисперсной структурой ($D_k\approx 10^{-5}$ м) Bi_k может

быть значительно больше единицы и в этом случае для испаряющейся капли температура в центре будет выше температуры на поверхности.

Особенность предлагаемого расчета заключается в следующем. Используя решение дифференциального уравнения теплопроводности шара [13]

$$\theta = \frac{t(R, \tau) - t_{ж}}{t_0 - t_{ж}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \sin(\mu_n \bar{R})}{(\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n) \mu_n \bar{R}} \exp[-\mu_n^2 Fo], \quad (4.43)$$

где $\bar{R} = R/R_0$ - текущий безразмерный радиус, определяем безразмерную разность температур между поверхностью капли и окружающим ее паром

$$\theta|_{\bar{R}=1} = \frac{T_{KR} - T_{\Pi}}{\bar{T}_K - T_{\Pi}} = \sum_{n=1}^3 \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \sin(\mu_n)}{(\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n) \mu_n} \exp[-\mu_n^2 Fo] \quad (4.44)$$

и далее находим температуру на поверхности капли

$$T_{KR} = (\bar{T}_K - T_{\Pi}) \theta|_{\bar{R}=1} + T_{\Pi}. \quad (4.45)$$

Так как выражение (4.43) получено для случая, когда при $\tau=0$ все точки шара с радиусом R_0 имеют одинаковую температуру t_0 , то предполагается, что в начале каждого шага по координате x капля имеет среднюю температуру \bar{T}_K , найденную из уравнения сохранения энергии для всего потока

$$\bar{T}_K = \left\{ \left[I_0^* - \dot{G}_{\Pi} \left(i_{\Pi}'' + \frac{w_{\Pi}^2}{2} \right) / \dot{G}_K - \frac{w_K^2}{2} \right] \right\} / c_{pK} + 273, \quad (4.46)$$

то есть на каждом шаге мы сводим задачу к решению (4.43).

Зная α и T_{KR} , по формуле (4.47) определяем результирующий поток пара от испаряющейся капли

$$\Delta j_{(K-\Pi)} = \alpha (T_{KR} - T_{\Pi}) / r. \quad (4.47)$$

При определении критерия Фурье $Fo = a_K \tau / (D_K/2)^2$ использовались зависимости:

$$a_K = \lambda_K / c_{pK} / \rho_K, \quad \tau = \Delta x / w_K.$$

Для нахождения корней трансцендентного характеристического уравнения

$$\operatorname{tg} \mu = -\mu / (Bi_K - 1) \quad (4.48)$$

внутри основной программы организуется дополнительный цикл.

При расчете высоковлажных потоков с очень мелкодисперсной структурой ($R_K \leq 10^{-2}$ мкм) необходимо учитывать поверхностные эффекты. В этом случае давление в капле

$$p_K = p_s + 2\sigma / R_K, \quad (4.49)$$

где p_s - давление насыщенного пара, σ - коэффициент поверхностного натяжения, а давление пара p_{Π} над каплей при равенстве химических потенциалов фаз можно найти из формулы Кельвина

$$\ln \frac{p_{\Pi}}{p_s} = \frac{v'}{v''} \left(1 - \frac{p_s}{p_{\Pi}} \right) + \frac{2\sigma v'}{R_K \tilde{R}_{\Pi} T_s}, \quad (4.50)$$

где \tilde{R}_{Π} - газовая постоянная пара.

В области, где p_s намного меньше критического давления пара, формула (4.50) переходит в (4.51)

$$p_{\Pi} = p_s \exp\left(\frac{2\sigma v'}{R_k \tilde{R}_{\Pi} T_s}\right) \quad (4.51)$$

Так, в [14] энтальпия капли с учетом поверхностной энергии записывается в виде

$$i_k = i_{k\infty} + \frac{3}{\rho_k R_k} \left(\sigma - T_k \frac{d\sigma}{dT_k} \right) - \frac{2\sigma}{\rho_k R_k}, \quad (4.52)$$

где $T_k \frac{d\sigma}{dT_k}$ - скрытая теплота образования единицы поверхности [5].

Для пузырьковой структуры энтальпию несущей жидкой среды с учетом поверхностной энергии предлагается рассчитывать из выражения

$$i_{\text{ж}} = i_{\text{ж}\infty} + \frac{3\dot{G}_{\Pi} w_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} R_{\Pi} \dot{G}_{\text{ж}} w_{\Pi}} \left(\sigma - T_{\text{ж}} \frac{d\sigma}{dT_{\text{ж}}} \right). \quad (4.53)$$

В дальнейшем мы не будем учитывать эти эффекты.

В качестве примера рассмотрим расчет сопла, работающего на высоковлажном потоке. Для этого уравнения (4.42), (4.44 - 4.48) необходимо дополнить следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} &= \frac{6\Delta j \dot{G}_k}{D_k w_k \rho_k}, \\ \frac{dD_k}{dx} &= -2\Delta j / (\rho_k w_k), \\ \frac{dp}{dx} &= -\frac{2p_0(p_0/p_{CP} - 1)x}{l^2 \left[(p_0/p_{CP} - 1) \left(\frac{x}{l} \right)^2 + 1 \right]^2}, \\ \frac{dw_{\Pi}}{dx} &= -\left(\frac{\dot{G}_{\Pi}}{w_{\Pi} \rho_{\Pi}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D^* \dot{G}_k}{w_k \pi D_k^3 \rho_k} + \tau_w \pi D_c + (w_{\Pi} - w_k) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} \right) / \dot{G}_{\Pi}, \\ \frac{dw_k}{dx} &= -\frac{1}{\rho_k w_k} \frac{dp}{dx} + \frac{6D^*}{\pi D_k^3 \rho_k w_k}, \\ \rho_{\Pi} &= 1,213 \cdot 10^{-5} p^{0,9375}, \quad T_{\Pi} = 5,677 \cdot p^{0,25} + 273, \quad \text{Re}_k = |w_{\Pi} - w_k| D_k \rho_{\Pi} / \mu_{\Pi}, \\ c_x &= 24 / \text{Re}_k \quad (0 \leq \text{Re}_k \leq 1), \\ c_x &= 24 / \text{Re}_k^{0,667} \quad (1 \leq \text{Re}_k \leq 390), \\ c_x &= 0,45 \quad (\text{Re}_k > 390), \\ D^* &= c_x \pi D_k^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_k) |w_{\Pi} - w_k| / 8, \quad F_c = \dot{G}_{\Pi} / (\rho_{\Pi} w_{\Pi}) + \dot{G}_k / (\rho_k w_k), \\ D_c &= (4F_c / \pi)^{0,5}, \quad w_{\text{см,д}} = \left(\frac{\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}^2 + \dot{G}_k w_k^2}{\dot{G}_{\Pi} + \dot{G}_k} \right)^{0,5}. \end{aligned}$$

Приведенная система уравнений реализована в программе LAV7 (см. приложение №3). Программа позволяет выявить влияние диаметра капель и длины сопла на его эффективность.

Так, например, выполненные расчеты для случая: $p_0=6,5 \cdot 10^5$ Па, $T_{к0}=438$ К, $T_{п0}=435$ К, $w_{п0}=15$ м/с, $w_{к0}=10$ м/с, $\dot{G}_{п0}=12 \cdot 10^{-3}$ кг/с, $\dot{G}_{к0}=0,4$ кг/с показали, что перевод двухфазного сопла с крупнодисперсной влаги ($D_k=8 \cdot 10^{-5}$ м) на мелкодисперсную ($D_k=8 \cdot 10^{-6}$ м) увеличивает коэффициент скорости с 0,549 до 0,816 (при $l_c=0,15$ м), что снижает потерю кинетической энергии в 2,1 раза!

В программе LAV4 (приложение №3) коэффициент теплоотдачи определяется по формуле (4.41). Сравнение результатов расчетов по этим программам позволяет выявить влияние нестационарного охлаждения капель на характеристики высоковлажного потока.

4.4. Смешение парок капельных потоков

С процессами смешения в потоке мы встречаемся в ряде энергетических устройств. Так, в эжекторе, работающем на паре, имеет место смешение парок капельного и газового потоков, в инжекторах - смешение парок капельного потока с потоком холодной жидкости. Снижение температуры перегретого пара в парохладителе также осуществляется путем ввода в камеру смешения холодной жидкости.

В термодинамическом аспекте расчет сводится, как правило, к определению скорости и температуры смеси на выходе из камеры смешения, при этом используют уравнения энергии для адиабатического канала

$\dot{I}_{CM} = i^* \dot{G}_{CM} = \sum_{i=1}^n \dot{G}_i i_i^*$ и сохранения потока массы $\dot{G}_{CM} = \sum_{i=1}^n \dot{G}_i$. Однако, подобный

расчет не дает ответа на вопрос - какой длины должна быть камера смешения и как должна изменяться площадь ее поперечного сечения вниз по потоку. На эти вопросы может ответить только расчет базирующийся на законах гидрогазодинамики, причем за счет геометрического воздействия на поток можно создать камеры, в которых $dp/dx < 0$, $dp/dx = 0$ и $dp/dx > 0$.

Рассмотрим процессы в камере смешения. Будем считать, что в камеру смешения поступает влажный пар, к которому подмешивается холодная жидкость. Подвод холодной жидкости в камеру может осуществляться как через периферийное сопло, так и через центральное сопло или группу сопел, причем последнее позволяет получить более однородную структуру потока. Упрощая задачу, будем считать, что в начальном сечении камеры холодные и горячие капли распределены равномерно в сухом насыщенном паре, но в целом поток термически и механически неравновесен. При своем движении в камере и наличии обменных процессов он будет переходить в равновесное состояние: значения температуры и скорости фаз будут близки между собой. Переход в это состояние или близкое к нему и определит длину камеры смешения.

Для потока холодных капель, на которых конденсируется пар, уравнение движения запишем в виде

$$\frac{dw_{\text{ХК}}}{dx} = -\frac{1}{w_{\text{ХК}} \rho_{\text{ХК}}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D_{\text{ХК}}^*}{\pi D_{\text{ХК}}^3 \rho_{\text{ХК}} w_{\text{ХК}}} + \frac{(w_{\text{П}} - w_{\text{ХК}}) d\dot{G}_{\text{П-К}}}{\dot{G}_{\text{ХК}} dx} . \quad (4.54)$$

Для горячих капель будем иметь

$$\frac{dw_{\text{ГК}}}{dx} = -\frac{1}{w_{\text{ГК}} \rho_{\text{ГК}}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D_{\text{ГК}}^*}{\pi D_{\text{ГК}}^3 \rho_{\text{ГК}} w_{\text{ГК}}} . \quad (4.55)$$

Производную $dw_{\text{П}}/dx$ определим из уравнения движения, записанного для всего потока

$$d(\dot{G}_{\text{ХК}} w_{\text{ХК}} + \dot{G}_{\text{ГК}} w_{\text{ГК}} + \dot{G}_{\text{П}} w_{\text{П}}) = -F_{\text{КС}} dp - \tau_w \pi D_{\text{КС}} dx . \quad (4.56)$$

Дифференцируя левую часть (4.56) и учитывая, что

$d(\dot{G}_{\text{ХК}} + \dot{G}_{\text{ГК}} + \dot{G}_{\text{П}}) = 0$ и $d\dot{G}_{\text{К-П}} = -d\dot{G}_{\text{ГК}}$, а $d\dot{G}_{\text{П-К}} = d\dot{G}_{\text{ХК}}$ и подставляя значения $dw_{\text{ХК}}/dx$ и $dw_{\text{ГК}}/dx$ из (4.54) и (4.55), получим

$$\frac{dw_{\text{П}}}{dx} = -\frac{1}{\dot{G}_{\text{П}}} \left(f_{\text{П}} \frac{dp}{dx} + \tau_w \pi D_{\text{КС}} + \frac{6D_{\text{ХК}}^* \dot{G}_{\text{ХК}}}{\pi D_{\text{ХК}}^3 \rho_{\text{ХК}} w_{\text{ХК}}} + \frac{6D_{\text{ГК}}^* \dot{G}_{\text{ГК}}}{\pi D_{\text{ГК}}^3 \rho_{\text{ГК}} w_{\text{ГК}}} + (w_{\text{П}} - w_{\text{ГК}}) \frac{d\dot{G}_{\text{К-П}}}{dx} \right) \quad (4.57)$$

Так как нами рассматривается прямая задача, то необходимо найти выражение градиента давления вдоль камеры смешения. Из уравнений сплошности, полагая $\rho_{\text{К}} = \text{const}$,

$$\rho_{\text{ХК}} d(w_{\text{ХК}} f_{\text{ХК}}) = d\dot{G}_{\text{П-К}} , \quad (4.58)$$

$$\rho_{\text{ГК}} d(w_{\text{ГК}} f_{\text{ГК}}) = -d\dot{G}_{\text{К-П}} , \quad (4.59)$$

определим соответственно

$$\frac{df_{\text{ХК}}}{dx} = \frac{1}{w_{\text{ХК}} \rho_{\text{ХК}}} \frac{d\dot{G}_{\text{П-К}}}{dx} - \frac{f_{\text{ХК}}}{w_{\text{ХК}}} \frac{dw_{\text{ХК}}}{dx} , \quad (4.60)$$

$$\frac{df_{\text{ГК}}}{dx} = -\frac{1}{w_{\text{ГК}} \rho_{\text{ГК}}} \frac{d\dot{G}_{\text{К-П}}}{dx} - \frac{f_{\text{ГК}}}{w_{\text{ГК}}} \frac{dw_{\text{ГК}}}{dx} , \quad (4.61)$$

где $d\dot{G}_{\text{П-К}}/dx = \pi D_{\text{ХК}}^2 j_{\text{П-ХК}} n_{\text{вХК}} F_{\text{КС}} > 0$ и $d\dot{G}_{\text{К-П}}/dx = \pi D_{\text{ГК}}^2 j_{\text{ГК-П}} n_{\text{вГК}} F_{\text{КС}} > 0$.

Производные $d\rho_{\text{П}}''/dx$ и $df_{\text{П}}/dx$ найдем из формул:

$$\frac{d\rho_{\text{П}}''}{dx} = \frac{d\rho_{\text{П}}''}{dp} \frac{dp}{dx} , \quad (4.62)$$

$$\frac{df_{\text{П}}}{dx} = \frac{dF_{\text{КС}}}{dx} - \frac{df_{\text{ХК}}}{dx} - \frac{df_{\text{ГК}}}{dx} . \quad (4.63)$$

Дифференцируя уравнение сплошности для всего потока

$$d(w_{\text{П}} f_{\text{П}} \rho_{\text{П}}'' + w_{\text{ГК}} f_{\text{ГК}} \rho_{\text{ГК}} + w_{\text{ХК}} f_{\text{ХК}} \rho_{\text{ХК}}) = 0 \quad (4.64)$$

с учетом (4.54), (4.55), (4.57) и (4.60)-(4.63) после долгих преобразований получим:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{w_{\text{П}}}{\left(\frac{w_{\text{П}}^2}{(dp/d\rho_{\text{П}}'')} - \frac{\dot{G}_{\text{ГК}}}{\dot{G}_{\text{П}}} \left(\frac{w_{\text{П}}}{w_{\text{ГК}}} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\text{П}}''}{\rho_{\text{ГК}}} \right)^2 - \frac{\dot{G}_{\text{ХК}}}{\dot{G}_{\text{П}}} \left(\frac{w_{\text{П}}}{w_{\text{ХК}}} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\text{П}}''}{\rho_{\text{ХК}}} \right)^2 - 1 \right)} \times f_{\text{П}}$$

$$\begin{aligned}
& \times \left\{ \frac{F_{KC}}{w_{\Pi}} \left[\left(1 - \frac{w_{\Pi}^2 \rho_{\Pi}''}{w_{ГК}^2 \rho_{ГК}} \right) D_{ГК}^* n_{vГК} + \left(1 - \frac{w_{\Pi}^2 \rho_{\Pi}''}{w_{ХК}^2 \rho_{ХК}} \right) D_{ХК}^* n_{vХК} \right] + \right. \\
& + \pi F_{KC} \left[\left(1 + \frac{w_{\Pi} - w_{ГК}}{w_{\Pi}} - \frac{w_{\Pi} \rho_{\Pi}''}{w_{ГК} \rho_{ГК}} \right) D_{ГК}^2 n_{vГК} j_{(ГК-\Pi)} - \right. \\
& - \left. \left. \left(1 + \frac{w_{\Pi} \rho_{\Pi}'' (w_{\Pi} - w_{ХК})}{w_{ХК}^2 \rho_{ХК}} - \frac{w_{\Pi} \rho_{\Pi}''}{w_{ХК} \rho_{ХК}} \right) D_{ХК}^2 n_{vХК} j_{(\Pi-ХК)} \right] - \right. \\
& \left. - w_{\Pi} \rho_{\Pi}'' \frac{dF_{KC}}{dx} + \frac{\tau_w \pi D_{KC}}{w_{\Pi}} \right\}. \quad (4.65)
\end{aligned}$$

Выражение (4.65) отражает более общий случай движения неравновесного двухфазного парок капельного потока, в котором имеют место как процессы испарения, так и конденсации.

Скорость изменения полной энтальпии потока холодных капель определяется потоком энтальпии конденсирующегося и потоком теплоты к каплям:

$$d(\dot{G}_{ХК} i_{ХК}^*) = i_{\Pi}^{**} j_{\Pi-ХК} \frac{\pi D_{ХК}^2 \dot{n}_{ХК}}{w_{ХК}} dx + \alpha_{\Pi-ХК} \frac{\pi D_{ХК}^2 \dot{n}_{ХК} (T_{\Pi} - T_{ХК})}{w_{ХК}} dx. \quad (4.66)$$

Разрешив уравнение (4.66) относительно $di_{ХК}^*/dx$ и учитывая, что

$$\begin{aligned}
\frac{d\dot{G}_{ХК}}{dx} = \frac{d\dot{G}_{\Pi-К}}{dx} = \frac{6\dot{G}_{ХК}}{D_{ХК} \rho_{ХК} w_{ХК}} j_{\Pi-ХК}, \text{ можно написать:} \\
\frac{di_{ХК}^*}{dx} = \left[(i_{\Pi}^{**} - i_{ХК}^*) j_{\Pi-ХК} + \alpha_{\Pi-ХК} (T_{\Pi} - T_{ХК}) \right] \frac{6}{w_{ХК} \rho_{ХК} D_{ХК}} = \\
= \left[(i_{\Pi}^{**} - i_{ХК}^*) j_{\Pi-ХК} + \alpha_{\Pi-ХК} (T_{\Pi} - T_{ХК}) \right] \frac{\pi D_{ХК}^2 \dot{n}_{ХК}}{w_{ХК} \dot{G}_{ХК}}. \quad (4.67)
\end{aligned}$$

Определив $di_{ХК}^*/dx$, найдем

$$\frac{dT_{ХК}}{dx} = \left(\frac{di_{ХК}^*}{dx} - w_{ХК} \frac{dw_{ХК}}{dx} \right) / c_{pХК}.$$

Температуру горячих капель определим из условия, что в адиабатическом канале полная энтальпия потока по заторможенным параметрам остается неизменной:

$$T_{ГК} = \left(I_{CM0}^* - \dot{G}_{\Pi} \left(i_{\Pi}'' + \frac{w_{\Pi}^2}{2} \right) - \dot{G}_{ХК} \left(i_{ХК} + \frac{w_{ХК}^2}{2} \right) \right) / \left(c_{pГК} \dot{G}_{ГК} \right) - \frac{w_{ГК}^2}{2c_{pГК}} + 273, \quad (4.68)$$

где I_{CM0}^* - полная энтальпия смеси на входе в камеру смешения.

Полученная замкнутая система уравнений, при заданном законе изменения $F_{KC}(x)$, позволяет определить p , w_{Π} , $w_{ХК}$, $w_{ГК}$, $T_{ГК}$ и $T_{ХК}$ вдоль камеры смешения. В приложении №3 приведен текст программы CONJT4, позволяющей выполнить расчет конической камеры.

Для решения обратной задачи созданы программы CNJT2, в которой вдоль камеры задан закон $p=(1+x^{0,5})p_0$, что позволяет найти форму камеры $F_{KC}=f(x)$ с $dp/dx > 0$ и CONJT2 для проектирования камер с $dp/dx < 0$ и $dp/dx = 0$.

В последнем случае достаточно в уравнении $p = p_0 / [(p_0 / p_{CP} - 1)(x/l)^2 + 1]$ положить $p_{CP} = p_0$ (см. приложение №3).

4.5. Охлаждение газового потока дисперсной фазой

В некоторых энергетических установках применяется охлаждение газового потока с помощью впрыска жидкой фазы. Так, например, в газотурбинных установках (ГТУ), с целью уменьшения удельной работы сжатия (приближаем процесс к изотермическому) и увеличения мощности ГТУ, во входной патрубке компрессора через форсунки впрыскивается вода. В этом случае возникают вопросы: на какой длине тракта влага полностью испарится, как при этом влияет размер капель, насколько увеличатся гидравлические потери и т. д. Если, кроме того, учесть, что в лопаточном компрессоре процессы протекают в поле центробежных и кориолисовых сил, то задача становится еще более сложной. Упростим задачу и рассмотрим процесс охлаждения горячего воздуха холодными каплями воды при их движении в цилиндрическом канале.

Уравнение сплошности для воздушно-парового потока при стационарном режиме течения имеет вид

$$d(w\rho f)_{\Gamma\Pi} = j_{\text{к-}\Gamma\Pi} \pi D_K^2 n_v F dx,$$

где F - площадь поперечного сечения канала.

Взяв производную от левой части уравнения, получим:

$$(wf)_{\Gamma\Pi} \frac{d\rho_{\Gamma\Pi}}{dp} \frac{dp}{dx} + (w\rho)_{\Gamma\Pi} \frac{df_{\Gamma\Pi}}{dx} + (\rho f)_{\Gamma\Pi} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} = j_{\text{к-}\Gamma\Pi} \pi D_K^2 n_v F. \quad (4.5.1)$$

Запишем уравнение движения для воздушно-парового потока

$$d(\dot{G}w)_{\Gamma\Pi} = w_K d\dot{G}_{\Pi} - D^* n_v F dx - f_{\Gamma\Pi} dp - \tau_w \pi D dx,$$

где $D^* = C_x (\text{Re}_K) \pi D_K^2 \rho_{\Gamma\Pi} |w_{\Gamma\Pi} - w_K| (w_{\Gamma\Pi} - w_K) \frac{1}{8}$;

из которого определим $\frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx}$:

$$\frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} = \frac{1}{(\dot{G}_{\Gamma 0} + \dot{G}_{\Pi})} \left[-f_{\Gamma\Pi} \frac{dp}{dx} - D^* n_v F - \tau_w \pi D + (w_K - w_{\Gamma\Pi}) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} \right]. \quad (4.5.2)$$

Для всего потока можно написать:

$$d((\dot{G}w)_{\Gamma\Pi} + (\dot{G}w)_K) = -F dp - \tau_w \pi D dx.$$

Раскрывая левую часть уравнения, найдем

$$\frac{dw_K}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left[-F \frac{dp}{dx} - \tau_w \pi D + (w_K - w_{\Gamma\Pi}) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} - (\dot{G}_{\Gamma 0} + \dot{G}_{\Pi}) \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} \right]. \quad (4.5.3)$$

Эту же производную можно получить и из уравнения движения капельного потока

$$d(\dot{G}w)_K = -w_K d\dot{G}_K + D^* n_v F dx - f_K dp$$

в более простом виде:

$$\frac{dw_K}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_K} \left(-f_K \frac{dp}{dx} + D^* n_v F \right). \quad (4.5.4)$$

Из уравнения сплошности для всего потока

$$(wf)_{\Gamma\Pi} \frac{d\rho_{\Gamma\Pi}}{dp} \frac{dp}{dx} + (w\rho)_{\Gamma\Pi} \frac{df_{\Gamma\Pi}}{dx} + (\rho f)_{\Gamma\Pi} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} + (\rho f)_k \frac{dw_K}{dx} + (w\rho)_k \frac{df_K}{dx} = 0$$

можно получить

$$\frac{(wf)_{\Gamma\Pi}}{a_{\Gamma\Pi}^2} \frac{dp}{dx} + ((w\rho)_{\Gamma\Pi} - (w\rho)_k) \frac{df_{\Gamma\Pi}}{dx} + (\rho f)_{\Gamma\Pi} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} + (\rho f)_k \frac{dw_K}{dx} = 0, \quad (4.5.5)$$

так как $f_K = F - f_{\Gamma\Pi}$, а $df_K = -df_{\Gamma\Pi}$, $\frac{dp}{d\rho} = a_{\Gamma\Pi}^2$, $\rho_{\Gamma\Pi} = \frac{\rho_{\Pi}\rho_{\Gamma}}{g_{\Pi}\rho_{\Gamma} + g_{\Gamma}\rho_{\Pi}}$, $g_{\Pi} = \frac{\dot{G}_{\Pi}}{\dot{G}_{\Pi} + \dot{G}_{\Gamma 0}}$,

$$g_{\Gamma} = \frac{\dot{G}_{\Gamma 0}}{\dot{G}_{\Pi} + \dot{G}_{\Gamma 0}}, \quad R_{\Gamma\Pi} = R_0 \left(\frac{g_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}} + \frac{g_{\Pi}}{\mu_{\Pi}} \right).$$

Из (4.5.1) определим

$$\frac{df_{\Gamma\Pi}}{dx} = \frac{1}{(w\rho)_{\Gamma\Pi}} \left(-\frac{(wf)_{\Gamma\Pi}}{a_{\Gamma\Pi}^2} \frac{dp}{dx} - (\rho f)_{\Gamma\Pi} \frac{dw_{\Gamma\Pi}}{dx} + j_{K-\Gamma\Pi} \pi D_k^2 n_v F \right). \quad (4.5.6)$$

Подставляя (4.5.2), (4.5.4), (4.5.6) в (4.5.5) после утомительных преобразований получим

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} = & \frac{(w^2\rho)_{\Gamma\Pi}}{\left[M_{\Gamma\Pi}^2 - \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi}} \left(\frac{w_{\Gamma\Pi}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Gamma\Pi}}{\rho_K} \right)^2 - 1 \right] f_{\Gamma\Pi} (\rho w)_K} \left[D^* \left(\frac{w_K \rho_K f_{\Gamma\Pi} n_v F}{(w\dot{G})_{\Gamma\Pi}} - \frac{6f_K}{w_k \pi D_k^3} \right) + \frac{w_K \rho_K f_{\Gamma\Pi} \tau_w \pi D}{(w\dot{G})_{\Gamma\Pi}} + \right. \\ & \left. + \left(\frac{w_K \rho_K}{(w\rho)_{\Gamma\Pi}} - \frac{w_K f_K \rho_{\Gamma\Pi}}{(w\dot{G})_{\Gamma\Pi}} (w_K - w_{\Gamma\Pi}) - 1 \right) \frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} \right], \end{aligned} \quad (4.5.7)$$

где $\frac{d\dot{G}_{\Gamma\Pi}}{dx} = j_{K-\Gamma\Pi} \pi D_k^2 n_v F$.

Определим температуру газопаровой смеси из уравнения энергии $\dot{I}_0^* = \dot{I}_{\Gamma 0}^* + \dot{I}_{\Pi 0}^* + \dot{I}_{K 0}^* = \dot{I}_{\Gamma\Pi 0}^* + \dot{I}_{K 0}^* = \dot{I}_{\Gamma\Pi}^* + \dot{I}_K^*$. Пренебрегая кинетической энергией, получим

$$T_{\Gamma\Pi} = \frac{\dot{I}_0 - \dot{G}_K c_{pK} T_K}{\dot{G}_{\Gamma\Pi} c_{p\Gamma\Pi}}, \quad (4.5.8)$$

где $c_{p\Gamma\Pi} = g_{\Pi} c_{p\Pi} + g_{\Gamma} c_{p\Gamma}$.

Из уравнения теплового баланса

$$\alpha_{\Gamma\Pi-K} \pi D_K^2 (T_{\Gamma\Pi} - T_K) d\tau = G_K di_K - r dG_K,$$

составленного для одиночной капли с учетом того, что $d\tau = dx/w_K$, получим:

$$\frac{dT_K}{dx} = \frac{3}{c_{pK} D_K} \left(\frac{2\alpha_{\Gamma\Pi-K} (T_{\Gamma\Pi} - T_K)}{\rho_K w_K} + r \frac{dD_K}{dx} \right), \quad (4.5.9)$$

где $\frac{dD_K}{dx} = -\frac{2j_{K-\Gamma\Pi}}{\rho_K w_K}$.

Рассмотрим процесс массопереноса от капель в газопаровой поток.

Изменение концентрации пара $c_{\text{ПГП}}$ в канале обусловлено потоком массы пара от испаряющихся капель

$$Fw_{\text{ГП}}dc_{\text{ПГП}} = j_{\text{к-ГП}}\pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} F dx, \quad (4.5.10)$$

где $c_{\text{ПГП}} = \frac{G_{\text{п}}}{V_{\text{ГП}}} = \frac{p'_{\text{п}}}{R_{\text{п}} T_{\text{ГП}}} = \rho_{\text{п}}'$; $p'_{\text{п}} = \frac{\dot{G}_{\text{п}} p \mu_{\text{ГП}}}{\dot{G}_{\text{ГП}} \mu_{\text{п}}}$ - парциальное давление пара в газопаровом потоке;

$j_{\text{к-ГП}} = \beta(c_{\text{Пвк}} - c_{\text{ПГП}}) = \frac{\beta}{R_{\text{п}} T_{\text{ГП}}} (p_s''(T_{\text{к}}) - p_{\text{п}}')$ - плотность потока пара от испаряющейся капли; $c_{\text{Пвк}}$ - концентрация пара на поверхности капли;

$c_{\text{ПГП}}$ - концентрация пара в газопаровой потоке. Изменение концентрации пара вдоль продольной оси в зависимости от координаты можно также определить в первом приближении из уравнения (4.5.10) при $c_{\text{Пвк}} = \text{const}$ путем его интегрирования. Разделим переменные в (4.5.10)

$$\frac{dc_{\text{ПГП}}}{c_{\text{Пвк}} - c_{\text{ПГП}}} = \frac{\beta}{w_{\text{ГП}}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} dx \quad \text{и после интегрирования получим}$$

$$\ln \left(\frac{(c_{\text{Пвк}} - c_{\text{ПГП}})_{x=0}}{(c_{\text{Пвк}} - c_{\text{ПГП}})_x} \right) = \frac{\beta}{w_{\text{ГП}}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} x. \quad \text{Потенцируя последнее выражение, найдем}$$

искомую зависимость

$$c_{\text{ПГП}} = c_{\text{Пвк}} - \frac{(c_{\text{Пвк}} - c_{\text{ПГП}})_{x=0}}{e^{\frac{\beta}{w_{\text{ГП}}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}} x}}. \quad (4.5.11)$$

Однако лучше (4.5.10) записать в дифференциальном виде и выполнить численное интегрирование

$$\frac{dc_{\text{ПГП}}}{dx} = \frac{j_{\text{к-ГП}}}{w_{\text{ГП}}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{v}}. \quad (4.5.12)$$

Задача реализована в программе PIPE_TF (см. приложение №3).

5. Вскипающий поток

5.1. Модель вскипающего потока

Если жидкость, нагретую до температуры насыщения, поместить в адиабатический сосуд с подвижной границей (цилиндр с поршнем), а затем увеличить объем, то произойдет падение давления с последующим вскипанием жидкости. Аналогичное явление имеет место и в потоке в процессе расширения. Таким образом, в результате падения давления жидкость становится перегретой относительно температуры насыщения при данном давлении, что приводит к образованию новой фазы (пузырьков пара в жидкости).

Процессы фазовых переходов, как известно из термодинамики, связаны с функцией состояния - изобарно-изотермическим потенциалом (другие

названия- свободная энтальпия, потенциал Гиббса) $\Phi = I - TS$, который на единицу массы записывается в виде $\varphi = i - Ts$ и называется химическим потенциалом. Доказывается, что

$$\left(\frac{\partial U}{\partial G}\right)_{V,S} = \left(\frac{\partial I}{\partial G}\right)_{p,S} = \left(\frac{\partial F}{\partial G}\right)_{V,T} = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial G}\right)_{p,T} = \varphi,$$

то есть химический потенциал связан с изменением количества вещества в системе при наличии фазовых переходов.

Для изобарно-изотермической системы, состоящей из жидкости и пара при плоской границе раздела фаз можно написать

$$d\Phi_c = (\varphi_{\Pi} - \varphi_{\text{ж}})dG_{\Pi},$$

но при переходе в равновесное состояние $d\Phi_c < 0$ (потенциал стремится к минимуму), следовательно, чтобы выполнялось условие $dG_{\Pi} > 0$ необходимо, чтобы $\varphi_{\Pi} < \varphi_{\text{ж}}$. Таким образом, устойчивой фазой при данных p и T является та, у которой химический потенциал имеет меньшее значение.

Введем понятие пузырька критического размера. Рассмотрим изобарно-изотермическую систему, состоящую из одной жидкости. В этом случае можно написать

$$\Phi_{c\text{ж}} = (G_{\Pi} + G_{\text{ж}}) \varphi_{\text{ж}}. \quad (5.1)$$

Такая запись предполагает, что молекулы пара растворены в жидкости (в дальнейшем часть молекул жидкости превратятся в молекулы пара).

Для системы, в которой образовался пузырек

$$\Phi_{c\Pi} = G_{\Pi} \varphi_{\Pi} + G_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}} + 4\pi\sigma R_{\Pi}^2. \quad (5.2)$$

Вычитая (5.1) из (5.2), получим

$$\Delta\Phi = (\varphi_{\Pi} - \varphi_{\text{ж}})G_{\Pi} + 4\pi\sigma R_{\Pi}^2, \quad (5.3)$$

но масса пузырька $G_{\Pi} = 4/3 \cdot \pi R_{\Pi}^3 \rho_{\Pi}$, тогда (5.3) перепишем в виде

$$\Delta\Phi = (\varphi_{\Pi} - \varphi_{\text{ж}}) 4/3 \cdot \pi R_{\Pi}^3 \rho_{\Pi} + 4\pi\sigma R_{\Pi}^2. \quad (5.4)$$

При $\varphi_{\Pi} > \varphi_{\text{ж}}$ функция (5.4) не имеет экстремума, но для случая $\varphi_{\Pi} < \varphi_{\text{ж}}$ он есть. Действительно,

$$\frac{d(\Delta\Phi)}{dR_{\Pi}} = -(\varphi_{\text{ж}} - \varphi_{\Pi}) R_{\Pi} \rho_{\Pi} + 2\sigma = 0, \quad (5.5)$$

откуда находим

$$R_{\Pi\text{кр}} = \frac{2\sigma}{(\varphi_{\text{ж}} - \varphi_{\Pi}) \rho_{\Pi}}, \quad (5.6)$$

то есть термодинамическая система, содержащая пузырьки критического размера, находится в неустойчивом равновесии (функция $\Delta\Phi$ имеет максимум). Переход в устойчивое состояние ($d\Phi_c = 0$) возможен при "гибели" или росте пузырьков. Таким образом, если в перегретой жидкости образовались пузырьки пара, то в дальнейшем одни из них будут расти, если $R_{\Pi} > R_{\Pi\text{кр}}$, а другие, имеющие $R_{\Pi} < R_{\Pi\text{кр}}$, погибнут. Связь между критическим радиусом пузырька и перегревом жидкости находят по формуле [13]

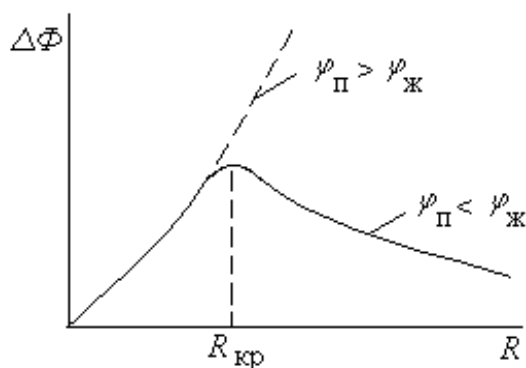


Рис. 5.1

$$R_{\text{КР}} = \frac{2\sigma T_s}{\Delta T_{\text{ПЖКР}} \rho_{\text{П}}'' r} \quad (5.7)$$

Если не делать различия между $\rho_{\text{П}}''$ и $\rho_{\text{П}}$, то приравнивая (5.6) и (5.7), найдем связь между разностью химических потенциалов и перегревом жидкости

$$\varphi_{\text{Ж}} - \varphi_{\text{П}} = \frac{\Delta T_{\text{ПЖКР}}}{T_s} r \quad (5.8)$$

Работа образования пузырька критического размера складывается из

работы образования объема пузырька и работы образования межфазной поверхности

$$W_{\text{КР}} = -\Delta p V_{\text{П}} + \sigma F_{\text{П}} = -\frac{2\sigma}{R_{\text{П}}} \frac{4}{3} \pi R_{\text{П}}^3 + 4\sigma \pi R_{\text{П}}^2 = \frac{4}{3} \pi R_{\text{П}}^2 \sigma \quad (5.9)$$

Подставляя (5.7) в (5.9), выразим $W_{\text{КР}}$ через $\Delta T_{\text{ПЖКР}}$

$$W_{\text{КР}} = \frac{16}{3} \pi \sigma^3 \left(\frac{T_s}{r \rho_{\text{П}}'' \Delta T_{\text{ПЖКР}}} \right)^2 \quad (5.10)$$

Из (5.10) видно, что $W_{\text{КР}} \sim 1/\Delta T_{\text{ПЖКР}}^2$. Следовательно, чем больше перегрев жидкости, тем меньше работа образования пузырька и больше вероятность вскипания жидкости. Не вдаваясь в тонкости теории фазовых переходов (интересующихся мы отсылаем к [15]), будем считать, что интенсивность образования новой фазы (число пузырьков, образующихся в единицу времени в единице объема) можно определить по формуле

$$J_{\text{КР}} = A \exp\left(-\frac{W_{\text{КР}}}{kT_s}\right), \quad (5.11)$$

где $A = NB$; $N \approx 10^{28} \text{ м}^{-3}$ - число молекул в единице объема жидкости; $B \approx 10^{10} \text{ с}^{-1}$, - кинетический множитель; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ - постоянная Больцмана.

Если считать, что радиус пузырька критического размера оценивается величиной 10^{-8} м , то для его образования, а следовательно, для вскипания жидкости, понадобится перегрев в несколько сот градусов. Так, для воды при $T_s = 433 \text{ К}$ $\Delta T_{\text{ПЖКР}} = 594,8$ градусов.

Опыты В.П.Скрипова и сотрудников [16] показали, что для вскипающей воды, находящейся в большом объеме, может быть использована зависимость

$$\ln J = 91 - \frac{W_{\text{КР}}}{kT_s}, \quad (5.12)$$

но и в этом случае перегрев жидкости будет значительным (отметим, что в формуле (5.11) $\ln A = 89,8$). Однако в реальных потоках жидкости образование новой фазы происходит при незначительных перегревах. Так, известно, что пузырьковое кипение в обогреваемых каналах при небольшой скорости движения воды начинается при перегреве всего на несколько градусов [17].

Такое расхождение теории с опытом не должно смущать, так как реальные потоки жидкости содержат растворенный газ, микроскопические пузырьки газа, множество частиц, да и движутся они в каналах с шероховатыми стенками (работа образования пузырька на стенке меньше, чем в неограниченном объеме)- все это облегчает образование новой фазы. Кроме того, в потоках с вихревой структурой имеют место локальные падения давления, что увеличивает перегрев жидкости и уменьшает работу образования пузырька.

В предлагаемой нами модели вскипающего потока, при рассмотрении процесса образования пузырьков используется формула (5.12), но с двумя коэффициентами ψ и ψ' . Первый коэффициент устанавливает связь между действительным и теоретическим перегревом жидкости

$$\Delta T_{ПЖкрд} = \psi \Delta T_{ПЖкр} , \quad (5.13)$$

где ψ учитывает физические свойства реального потока. Тогда с учетом (5.7) можно написать

$$\psi = \frac{R_{ПЖкр} \Delta T_{ПЖД} \rho_{П}'' r}{2\sigma T_S} , \quad (5.14)$$

при этом

$$W_{кр,д} = \frac{16}{3} \pi \sigma^3 \left(\frac{\psi T_S}{r \rho_{П}'' \Delta T_{ПЖкрд}} \right)^2 . \quad (5.15)$$

Теперь формулы (5.12) и (5.11) перепишем в виде

$$\ln J_{крд} = 91 - \psi' \frac{W_{крд}}{k T_S} , \quad (5.16)$$

$$J_{крд} = A \exp \left(- \psi' \frac{W_{крд}}{k T_S} \right) , \quad (5.17)$$

где $A = 3,3174 \cdot 10^{39} \text{ 1}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$.

Поток пузырей в элементарном объеме $F dx$ найдем из выражения

$$\dot{n}_{П,кр} = J_{крд} F dx , \quad (5.18)$$

при этом расход паровой фазы составит

$$\dot{G}_{П,кр} = \dot{n}_{П,кр} \frac{\pi D_{Пжт}^3 \rho_{П}}{6} . \quad (5.19)$$

Считается, что при дальнейшем расширении потока число пузырьков остается постоянным, а их рост определяется по одной из существующих моделей [18]:

$$\frac{dD_{П}}{dx} = 8 \lambda_{жс} \beta c_{ржс} \rho_{жс} (T_{жс} - T_S) T_{жс} - T_S / \left((r \rho_{П}'')^2 D_{П} W_{П} \right) . \quad (5.20)$$

Так как в канал поступает горячая жидкость, имеющая энтальпию $i_{жс0}^*$ и поток движется в адиабатическом канале, то можно написать

$$\dot{i}_{жс0}^* = \dot{G}_{жс0} i_{жс0}^* = \dot{G}_{П} \left(i_{П} + \frac{W_{П}^2}{2} \right) + \dot{G}_{жс} \left(i_{жс} + \frac{W_{жс}^2}{2} \right) = const . \quad (5.21)$$

Из уравнения (5.21) можно найти температуру жидкости в любом сечении

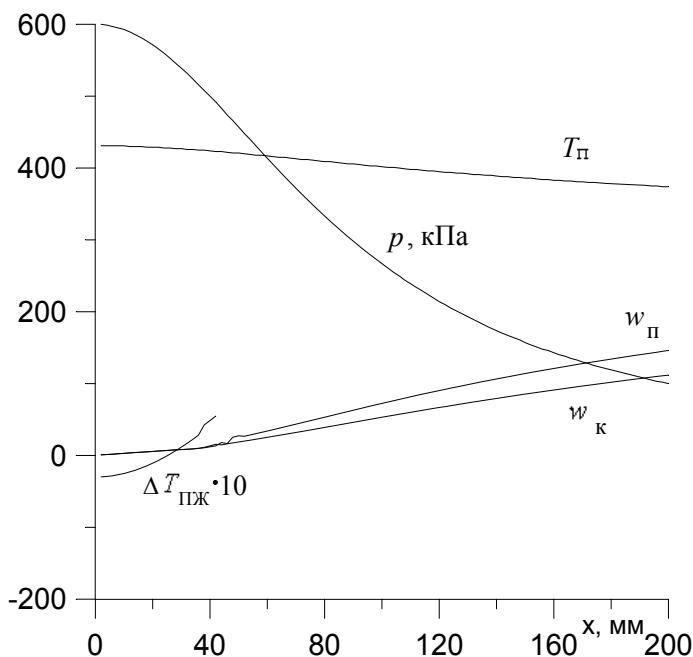


Рис. 5.2

канала, зависящую от \dot{G}_Π и, следовательно, от $J_{\text{КРД}}$. При определенной величине $J_{\text{КРД}}$ возможна ситуация, когда перегрев жидкости $\Delta T_{\text{ПЖ}} = T_{\text{ж}} - T_s(p)$ будет равен нулю или станет отрицательным, что приведет к прекращению роста пузырьков или к процессу конденсации из-за изменения направления теплового потока. Чтобы избежать этого, используется коэффициент ψ' , корректирующий величину $J_{\text{КРД}}$ (см. кривую $\Delta T_{\text{ПЖ}}$ на рис. 5.2).

В уравнении движения пузырька учитывается присоединенная масса, то есть

считается, что он “толкает” перед собой массу жидкости, заключенную в половине его объема - $\rho_{\text{ж}} V_{\text{П}}/2$, а это приводит к появлению дополнительной силы $\frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} V_{\text{П}} \left(\frac{dw_{\text{П}}}{d\tau} - \frac{dw_{\text{ж}}}{d\tau} \right)$, которая тормозит пузырек (отметим, что при расчете газочапельных потоков ее, как правило, не учитывают).

С учетом сказанного уравнение движения пузырька можно записать в виде

$$\rho_{\text{П}} V_{\text{П}} \frac{dw_{\text{П}}}{d\tau} = -V_{\text{П}} \frac{dp}{dx} + \frac{c_x \rho_{\text{ж}} \pi D_{\text{П}}^2}{8} (w_{\text{ж}} - w_{\text{П}}) |w_{\text{ж}} - w_{\text{П}}| - \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} V_{\text{П}} \left(\frac{dw_{\text{П}}}{d\tau} - \frac{dw_{\text{ж}}}{d\tau} \right). \quad (5.22)$$

После достижения потоком в процессе расширения граничной плотности [21]

$$\rho_{\text{ГР}} = \rho_{\text{ж}} (1 - \pi \sqrt{2}/6) \quad (5.23)$$

структура его переходит из пузырьковой в капельно-паровую, и дальнейший расчет выполняется на основе ранее рассмотренных моделей (см., например, LAV7).

Модель вскипающего потока реализована в программе LAV21D (см. приложение №4 и рис.5.2).

5.2. Расчет сопла Лавалья с парогенерирующей решеткой

Использование вскипающих потоков в качестве рабочего тела в энергетических установках и струйных аппаратах ставит задачу об определении предельно возможной степени преобразования теплоты жидкости в кинетическую энергию направленного потока [19].

Исследования сопел, работающих на влажном паре, показывают, что их эффективность с увеличением влажности потока падает [20]. Однако расчеты

свидетельствуют о том, что с уменьшением диаметра капель к.п.д. сопла возрастает.

Опыты с соплами Лавая традиционной формы, работающими на горячей воде близкой по состоянию к насыщенной при низких начальных давлениях ($p_0^* = 0,4 \dots 0,8$ МПа), установили, что их коэффициент скорости $\varphi_C = w_d/w_T$ невысок из-за значительной термической и механической неравновесности потока. Видимое вскипание жидкости в таких соплах происходит чуть ниже горла сопла и распространяется от стенки в ядро потока. В области горла поток имеет ярко выраженную неоднородность - вскипевший пристенный поток и метастабильное ядро жидкости. Взаимодействие между этими потоками приводит в дальнейшем к распаду центральной струи на крупные капли, которые и порождают неравновесность потока.

Так, у сопла Лавая (диаметр горла 3 мм, среза- 10 мм, длина расширяющейся части 125 мм), работающего на горячей воде с начальными параметрами $p_0^* = 0,6$ МПа, $T_0^* = 426$ К, коэффициент скорости сопла $\varphi_C = 0,7$.

Известно, что среднемассовый диаметр капель, образующихся при вскипании потока, пропорционален диаметру канала (речь идет о каналах диаметром 1...3 мм). Таким образом, установка в сопло парогенерирующей решетки (диска с цилиндрическими каналами) должна приводить к образованию мелкодисперсной структуры потока и повышению эффективности сопла. Идея создания такого сопла принадлежит профессору В.А. Зысину [21].

Проф. В.А. Барилевичем было создано сопло с парогенерирующей решеткой с коэффициентом скорости $\varphi_C = 0,85 \dots 0,87$ [19]. Столь высокое значение φ_C , полученное нами для сопла, работающего на перегретой воде при низком начальном давлении, на наш взгляд, является близким к предельному и подтверждается опытами немецкого исследователя О.Френцля с соплами Лавая традиционной формы при высоких начальных давлениях; так, при $p_0^* = 4$ МПа он получил $\varphi_C = 0,87$.

Рассмотрим основные положения расчета таких сопел. С уменьшением числа отверстий в парогенерирующей решетке растет перепад статического давления на ней. При определенном перепаде можно получить за решеткой поток, у которого плотность смеси будет меньше граничной. В этом случае расчет сопла значительно упрощается и сводится к расчету высоковлажного потока, имеющего капельно-паровую структуру.

Физические величины за решеткой при заданном размере капель определяются из условия сохранения полной энтальпии и расхода до и за решеткой

$$\dot{I}_0^* = \dot{G}_{\text{ПН}} \left(i_1'' + \frac{w_{\text{ПН}}^2}{2} \right) + \dot{G}_{\text{К1}} \left(i_{\text{К1}}'' + \frac{w_{\text{К1}}^2}{2} \right), \quad \dot{G}_{\text{КР}} = \dot{G}_{\text{ПН}} + \dot{G}_{\text{К1}},$$

где индекс "1" относится к потоку за решеткой.

Критический расход через сопло, конструкция которого рассматривается в [19], определяется по эмпирической формуле, полученной нами при исследовании сопел, работающих на перегретой воде

$$\frac{\dot{G}_{КРД}}{F_P} = 1,3434 p_0^{0,7512} \left(\frac{\Delta t_H}{t_S(p_0)} \right)^{0,3719} \left(\frac{l}{d} \right)_P^{-0,0276},$$

где $\dot{G}_{КРД}$ - действительный расход горячей воды через сопло при критическом режиме истечения, кг/с; F_P - площадь живого сечения парогенерирующей решетки, м²; p_0 - давление горячей воды перед соплом, Па; $\Delta t_H = t_S(p_0) - t_0$ - недогрев воды до температуры насыщения при давлении p_0 ; t_0 - температура горячей воды на входе в сопло; $(l/d)_P$ - отношение длины канала решетки к его диаметру.

В опытах p_0 изменялось от 0,5 до 0,8 МПа, $\Delta t_H / t_S(p_0) = 0,04 \dots 0,08$, $(l/d)_P = 6 \dots 10$.

Задача описывается следующей системой уравнений.

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} = & \left\{ \frac{3}{4} c_x \rho_{\Pi} w_{\Pi} \frac{f_{\text{жс}}}{D_K} \left(\frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \right) \right\} \frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \left\{ \left(\frac{w_K}{w_{\Pi}} \right)^2 - \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K} \right\} + 6 \left(2 - \frac{w_K}{w_{\Pi}} - \frac{w_{\Pi} \rho_{\Pi}}{w_K \rho_K} \right) \frac{f_{\text{жс}} j_{K-\Pi}}{D_K} + \\ & + c_f \frac{w_{\Pi} \rho_{\Pi}}{2} \pi D_C - w_{\Pi} \rho_{\Pi} \frac{dF_C}{dz} \left\} w_{\Pi} / \left\{ \left(\frac{w_{\Pi}^2}{(dp/d\rho_{\Pi})} - \left(\frac{w_{\Pi}}{w_K} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K} \right)^2 \frac{\dot{G}_K}{\dot{G}_{\Pi}} - 1 \right) f_{\Pi} \right\}, \end{aligned} \quad (5.24)$$

где $f_{\text{жс}} = \dot{G}_K / \rho_K / w_K$.

Здесь приводится только окончательное выражение для dp/dz , так как вывод его утомителен, а последовательность операций для его получения уже излагалась в предыдущих параграфах. Так, например, если в формуле (4.65) положить равными нулю $\dot{G}_{\text{жк}}, D_{\text{жк}}^*, n_{\text{жк}}$, то получим (5.24). Формула имеет предельный переход, и при отсутствии капель и изоэнтропийном течении будем иметь (см. формулу 1.4)

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} &= -kM^2 p \left(\frac{dF_C}{dz} \right) / ((M^2 - 1)F_C), \\ \frac{dw_K}{dz} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K} \frac{w_K}{D_K} \left(\frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \right) \frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \left| - \frac{1}{\rho_K w_K} \frac{dp}{dz} \right., \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\frac{dw_{\Pi}}{dz} = -\frac{3}{4} c_x \frac{f_{\text{жс}}}{D_K} \frac{w_K^2}{w_{\Pi} f_{\Pi}} \left(\frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \right) \frac{w_{\Pi}}{w_K} - 1 \left| - \frac{1}{\rho_{\Pi} w_{\Pi}} \frac{dp}{dz} - \frac{c_f w_{\Pi} \pi D_C}{2 f_{\Pi}} - \frac{6(w_{\Pi} - w_K) f_{\text{жс}} j_{K-\Pi}}{\rho_{\Pi} w_{\Pi} f_{\Pi} D_K} \right., \quad (5.26)$$

$$\frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dz} = 6 j_{K-\Pi} \dot{G}_K / D_K / w_K / \rho_K, \quad (5.27)$$

$$\frac{dD_K}{dz} = -2 j_{K-\Pi} / w_K / \rho_K, \quad (5.28)$$

$$\frac{dx}{dz} = \frac{j_{K-\Pi} \pi D_K^2 n_v F_C}{\dot{G}_{KP}}, \quad (5.29)$$

$$\frac{dT_K}{dz} = -\frac{6}{c_{pK}\rho_K D_K w_K} (\alpha_{K-\Pi}(T_K - T_\Pi) + \tilde{r}j_{K-\Pi}), \quad (5.30)$$

где $\dot{n} = 6\dot{G}_{K1}/(\pi D_{K1}^3 \rho_{K1})$; $n_v = \dot{n}/(w_K F_C)$; $j_{K-\Pi} = \frac{\chi}{\sqrt{2\pi\tilde{R}_\Pi}} \left(\frac{p''(T_K)}{\sqrt{T_K}} - \frac{p}{\sqrt{T}} \right)$;

где $\dot{n} = 6\dot{G}_{K1}/(\pi D_{K1}^3 \rho_{K1})$; $n_v = \dot{n}/(w_K F_C)$; $j_{K-\Pi} = \frac{\chi}{\sqrt{2\pi\tilde{R}_\Pi}} \left(\frac{p''(T_K)}{\sqrt{T_K}} - \frac{p}{\sqrt{T}} \right)$; --

$$\chi = \frac{A}{p^{0,56}}; T = f(p); c_f = f_1(\text{Re}_\Pi); c_x = f_1(\text{Re}_K); \dot{G}_K = \dot{G}_{KP} - \dot{G}_\Pi; f_\Pi = F_C - f_{\text{ж}}.$$

Решение приведенной системы уравнений реализовано в программе "LAV27A" (см. приложение № 4 и рис.5.3).

При расчетах использовались опытные данные и геометрические размеры реально исследованного сопла [19]. Так, при $p_0^* = 0,6$ МПа, $T_0^* = 428$ К, $p_1 = 0,45$ МПа, критическом расходе через сопло $\dot{G}_{KP} = 0,28$ кг/с и принятых $A = 1,037$ и $D_{K1} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м рассчитанный коэффициент скорости сопла ($\varphi_C = 0,86$) оказался близким к экспериментальному, а давление на срезе сопла ($D_{CP} = 2 \cdot 10^{-2}$ м) практически совпало с атмосферным. Однако при этом пришлось увеличить размер горла с $8 \cdot 10^{-3}$ м до $9 \cdot 10^{-3}$ м. В ходе численного эксперимента удавалось при $D_{K1} = 6 \cdot 10^{-5}$ м пропустить вышеуказанный расход через горло диаметром $8 \cdot 10^{-3}$ м, но при этом φ_C оказалось равным 0,7. Этот результат можно объяснить

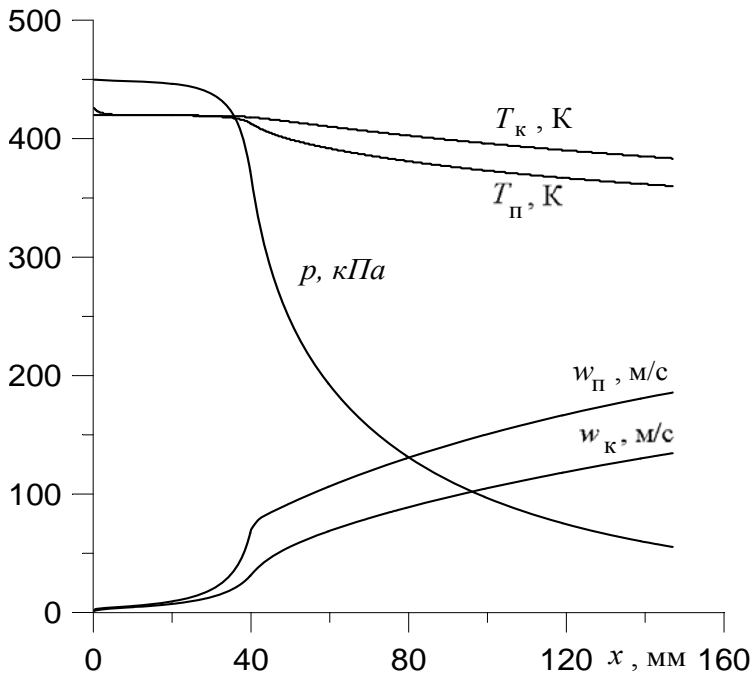


Рис. 5.3

как явлением метастабильности жидкости, так и тем, что в реальных потоках из-за значительного ускорения несущей фазы в области горла имеет место интенсивное дробление капель несколько ниже горла, что позволяет пропустить через минимальное сечение сопла больший расход, определяемый диаметром капель на входе в горло. Это явление может быть учтено в расчетах, если ввести время распада капель и критерий Вебера.

6. Поток с пузырьковой структурой

Движение жидкости с пузырьками газа или пара встречается во многих технических устройствах. Так, в топочной камере котла в экранных трубах

движется вода с пузырьками пара. В рабочее колесо насоса при определенных условиях (в случае низкого статического давления) может поступать жидкость с пузырьками газа. При движении в скважине нефти, содержащей растворенный газ, также могут образовываться пузырьки газа. Дросселирование жидкости регулирующими устройствами может привести к появлению пузырьков. В диффузоре инжектора протекает процесс конденсации пузырьков пара. Приведенные примеры свидетельствуют о том, что будущему инженеру в своей деятельности придется решать задачи о движении потоков с пузырьковой структурой. Следовательно, необходимо знать основные положения расчета таких потоков.

6.1. Изотермическое движение жидкости с пузырьками воздуха

В данном параграфе мы рассмотрим установившееся изотермическое движение жидкости с пузырьками воздуха в канале в одномерной постановке на основе прямой и обратной задач. Будем считать, что воздух в пузырьке подчиняется закону идеального газа, а плотность воздуха в пузырьке зависит от давления, $\rho_{ж} = \text{const}$. Так как масса пузырька при движении остается неизменной, то его диаметр будет зависеть только от давления

$$D_{\Pi} = \sqrt[3]{\frac{6G_{\Pi 0} \tilde{R}_{\Pi} T}{\pi p}}, \quad (6.1)$$

где $G_{\Pi 0} = \frac{\pi D_{\Pi 0}^3}{6} \rho_{\Pi 0}$ - масса пузырька в начальном сечении канала.

Задаваясь расходом пузырьков, определим их поток

$$\dot{n} = \frac{6\dot{G}_{\Pi 0}}{\pi D_{\Pi 0}^3 \rho_{\Pi 0}}, \quad 1/\text{с}. \quad (6.2)$$

Объемный расход воздуха в пузырьках и жидкости найдем соответственно по формулам (6.3) и (6.4)

$$\dot{V}_{\Pi} = \frac{\pi D_{\Pi}^3}{6} \dot{n}, \quad (6.3)$$

$$\dot{V}_{ж} = (\dot{G}_{см} - \dot{G}_{\Pi}) / \rho_{ж}. \quad (6.4)$$

При раздельном течении фаз плотность смеси определяется из выражения

$$\rho_{см} = \frac{\dot{G}_{см}}{\dot{V}_{\Pi} + \dot{V}_{ж}}, \quad (6.5)$$

а для гомогенного потока из (6.6)

$$\rho_{см.г} = (1 - \alpha) \rho_{ж} + \alpha \rho_{п}, \quad (6.6)$$

где $\alpha = V_{\Pi} / V_{см}$ - объемная доля газа.

Для решения задачи составим систему дифференциальных уравнений.

Уравнение движения пузырька:

$$\begin{aligned} \rho_{\Pi} V_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{d\tau} = -V_{\Pi} \frac{dp}{dx} + \frac{\pi D_{\Pi}^2}{8} \rho_{\text{ж}} c_x |w_{\text{ж}} - w_{\Pi}| (w_{\text{ж}} - w_{\Pi}) - \\ - \frac{1}{2} \rho_{\text{ж}} V_{\Pi} \left(\frac{dw_{\Pi}}{d\tau} - \frac{dw_{\text{ж}}}{d\tau} \right) \pm g V_{\Pi} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Pi}) \end{aligned} \quad (6.7)$$

В уравнении (6.7) кроме сил статического давления и сопротивления учитывается сила, обусловленная присоединенной массой (третий член в правой части уравнения) и подъемная сила, действующая на пузырек (четвертое слагаемое).

При движении потока в вертикальных каналах в случае подъемного течения сила Архимеда способствует ускорению пузырька и в уравнении (6.7) четвертое слагаемое должно быть положительным, при опускном движении - отрицательным. Для горизонтальных каналов, если задача решается в одномерной постановке, она равна нулю.

Уравнение движения для всего потока

$$d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi} + \dot{G}_{\text{ж}} w_{\text{ж}}) = -F_C dp - \tau_w \pi D_C dx . \quad (6.8)$$

Так как расход жидкости и пузырьков газа остается постоянным, то уравнения сплошности фаз имеют вид:

$$d(f_{\Pi} \rho_{\Pi} w_{\Pi}) = 0 , \quad (6.9)$$

$$d(f_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}}) = 0 . \quad (6.10)$$

Дифференцируя выражение $F_C = f_{\text{ж}} + f_{\Pi}$, получим

$$df_{\text{ж}} = dF_C - df_{\Pi} \quad (6.11)$$

Из $\rho = p / (\tilde{R}_{\Pi} T)$ следует, что

$$d\rho = dp / (\tilde{R}_{\Pi} T) . \quad (6.12)$$

Преобразуем уравнение (6.7) к виду

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\rho_{\text{ж}}}{2\rho_{\Pi}} \right) \frac{dw_{\Pi}}{dx} = - \frac{1}{\rho_{\Pi} w_{\Pi}} \frac{dp}{dx} + \frac{3}{4} \frac{\rho_{\text{ж}} c_x}{\rho_{\Pi} w_{\Pi} D_{\Pi}} |w_{\text{ж}} - w_{\Pi}| (w_{\text{ж}} - w_{\Pi}) + \\ + \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}}}{2\rho_{\Pi} w_{\Pi}} \frac{dw_{\text{ж}}}{dx} \pm \frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Pi})}{\rho_{\Pi} w_{\Pi}} . \end{aligned} \quad (6.13)$$

Уравнение (6.8) после преобразований запишем следующим образом:

$$\frac{dw_{\text{ж}}}{dx} = - \left(F_C \frac{dp}{dx} + \tau_w \pi D_C + \dot{G}_{\Pi} \frac{dw_{\Pi}}{dx} \right) / \dot{G}_{\text{ж}} . \quad (6.14)$$

Подставив (6.14) в (6.13), получим

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\rho_{\text{ж}}}{2\rho_{\Pi}} + \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}} \dot{G}_{\Pi}}{2\rho_{\Pi} w_{\Pi} \dot{G}_{\text{ж}}} \right) \frac{dw_{\Pi}}{dx} = - \left(\frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}} F_C}{2\rho_{\Pi} w_{\Pi} \dot{G}_{\text{ж}}} + \frac{1}{\rho_{\Pi} w_{\Pi}} \right) \frac{dp}{dx} + \\ + \frac{3}{4} \frac{\rho_{\text{ж}} c_x}{\rho_{\Pi} w_{\Pi} D_{\Pi}} |w_{\text{ж}} - w_{\Pi}| (w_{\text{ж}} - w_{\Pi}) - \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}} \tau_w \pi D_C}{2\rho_{\Pi} w_{\Pi} \dot{G}_{\text{ж}}} \pm \frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Pi})}{\rho_{\Pi} w_{\Pi}} . \end{aligned} \quad (6.15)$$

Уравнения (6.9) и (6.10) преобразуем к виду

$$\frac{df_{\Pi}}{dx} = - \frac{f_{\Pi}}{\rho_{\Pi}} \frac{d\rho_{\Pi}}{dx} - \frac{f_{\Pi}}{w_{\Pi}} \frac{dw_{\Pi}}{dx} , \quad (6.16)$$

$$\frac{df_{ж}}{dx} = -\frac{f_{ж}}{w_{ж}} \frac{dw_{ж}}{dx}. \quad (6.17)$$

Подставив (6.16) и (6.17) в (6.11) с учетом (6.12), получим

$$\frac{dw_{ж}}{dx} = -\left(\frac{w_{ж}}{f_{ж}} \frac{dF_c}{dx} + \frac{f_{п} w_{ж}}{\rho_{п} \tilde{R}_{п} T f_{ж}} \frac{dp}{dx} + \frac{f_{п} w_{ж}}{f_{ж} w_{п}} \frac{dw_{п}}{dx} \right). \quad (6.18)$$

Подставим (6.14) в (6.18), тогда

$$\left(\frac{\dot{G}_{п}}{\dot{G}_{ж}} - \frac{f_{п} w_{ж}}{f_{ж} w_{п}} \right) \frac{dw_{п}}{dx} = \left(\frac{f_{п} w_{ж}}{\rho_{п} \tilde{R}_{п} T f_{ж}} - \frac{F_c}{\dot{G}_{ж}} \right) \frac{dp}{dx} - \frac{\tau_w \pi D_c}{\dot{G}_{ж}} + \frac{w_{ж}}{f_{ж}} \frac{dF_c}{dx}. \quad (6.19)$$

Введем обозначения:

$$A = \frac{\dot{G}_{п}}{\dot{G}_{ж}} - \frac{f_{п} w_{ж}}{f_{ж} w_{п}},$$

$$B = 1 + \frac{\rho_{ж}}{2\rho_{п}} + \frac{\rho_{ж} w_{ж} \dot{G}_{п}}{2\rho_{п} w_{п} \dot{G}_{ж}},$$

$$N = \frac{B}{A}.$$

Приравняв производные $dw_{п}/dx$ из (6.15) и (6.19), найдем dp/dx (здесь считаем, что канал вертикальный, а поток восходящий):

$$\frac{dp}{dx} = \left[-\frac{3}{4} \frac{\rho_{ж} c_x}{\rho_{п} w_{п} D_{п}} |w_{ж} - w_{п}| (w_{ж} - w_{п}) - \left(N - \frac{\rho_{ж} w_{ж}}{2\rho_{п} w_{п}} \right) \frac{\tau_w \pi D_c}{\dot{G}_{ж}} - \frac{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}{\rho_{п} w_{п}} + N \frac{w_{ж}}{f_{ж}} \frac{dF_c}{dx} \right] / \left[N \left(\frac{F_c}{\dot{G}_{ж}} - \frac{f_{п} w_{ж}}{\rho_{п} \tilde{R}_{п} T f_{ж}} \right) - \frac{\rho_{ж} w_{ж}}{2\rho_{п} w_{п}} \frac{F_c}{\dot{G}_{ж}} - \frac{1}{\rho_{п} w_{п}} \right], \quad (6.20)$$

где

$$\Delta_c = \left[N \left(\frac{F_c}{\dot{G}_{ж}} - \frac{f_{п} w_{ж}}{\rho_{п} \tilde{R}_{п} T f_{ж}} \right) - \frac{\rho_{ж} w_{ж}}{2\rho_{п} w_{п}} \frac{F_c}{\dot{G}_{ж}} - \frac{1}{\rho_{п} w_{п}} \right] - \text{главный определитель системы.}$$

Из (6.20) видно, что из-за силы, обусловленной присоединенной массой (см. уравнение (6.7)), не удастся получить сравнительно простое и наглядное выражение для dp/dx , как в других моделях.

Определив dp/dx , найдем $dw_{п}/dx$ из (6.15), а $dw_{ж}/dx$ из (6.14), таким образом, решается прямая задача. Если задан закон $p=f(x)$, то уравнение (6.20) не используется. Отметим, что при решении данной задачи необходимо следить, чтобы в течение счета, если поток расширяется, выполнялось условие $\rho_{см} \leq \rho_{гр}$, где $\rho_{гр}$ - граничная плотность, при которой структура потока переходит из пузырьковой в газокапельную.

Решение прямой задачи реализовано в программе "BUBBLE", а обратной - в "BUBBLE1" (программы представлены в приложении №5). Программа "BUBBLE2", где рассматривается прямая задача движения потока воды с пузырьками воздуха в канале переменного сечения, позволяет при

изменении начальных параметров потока и геометрии канала исследовать кризисные явления в двухфазных потоках (см. приложение №5).

6.2 Газожидкостный поток пузырьковой структуры с учетом теплообмена между фазами

Расчеты, выполненные по программам “BUBBLE”, “BUBBLE1”, “BUBBLE2” показывают, что если в уравнении движения пузырька учитывается сила, обусловленная присоединенной массой, то скольжение между пузырьками и жидкостью незначительно ($w_{\text{п}} / w_{\text{ж}} = 1,01 \dots 1,02$). Полученный результат дает право полагать $w_{\text{п}} / w_{\text{ж}} = 1$, то есть в дальнейшем будем считать $w_{\text{п}} = w_{\text{ж}} = w$.

Рассмотрим горизонтальный канал. Для всего потока можно написать

$$\frac{dw}{dx} = - \left(F_C \frac{dp}{dx} + \tau_w \pi D_C \right) / \dot{G}_{\text{..M}} . \quad (6.21)$$

Так как $\dot{G}_{\text{см}} = \dot{G}_{\text{ж}} + \dot{G}_{\text{г}} = \text{const}$, а фазовые переходы отсутствуют, то $d\dot{G}_{\text{г}} = d(\rho_{\text{г}} w f_{\text{г}}) = 0$ и $d\dot{G}_{\text{ж}} = d(\rho_{\text{ж}} w f_{\text{ж}}) = 0$. Дифференцируя эти уравнения и разрешая их относительно $df_{\text{г}}$ и $df_{\text{ж}}$, получим

$$\frac{df_{\text{г}}}{dx} = - \frac{f_{\text{г}}}{w} \frac{dw}{dx} - \frac{f_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}} \frac{d\rho_{\text{г}}}{dx} , \quad (6.22)$$

$$\frac{df_{\text{ж}}}{dx} = - \frac{f_{\text{ж}}}{w} \frac{dw}{dx} . \quad (6.23)$$

Подставим (6.22) и (6.23) в (6.24)

$$\frac{dF_C}{dx} = \frac{df_{\text{ж}}}{dx} + \frac{df_{\text{г}}}{dx} \quad (6.24)$$

и найдем $d\rho_{\text{г}} / dx$:

$$\frac{d\rho_{\text{г}}}{dx} = - \frac{\rho_{\text{г}}}{f_{\text{г}}} \frac{dF_C}{dx} - \frac{\rho_{\text{г}}}{f_{\text{г}}} \frac{F_C}{w} \frac{dw}{dx} . \quad (6.25)$$

Перепишем (6.25) с учетом (6.21)

$$\frac{d\rho_{\text{г}}}{dx} = - \frac{\rho_{\text{г}}}{f_{\text{г}}} \frac{dF_C}{dx} + \frac{\rho_{\text{г}}}{\dot{G}_{\text{см}} f_{\text{г}}} \frac{F_C^2}{w} \frac{dp}{dx} + \frac{\rho_{\text{г}} F_C \tau_w \pi D_C}{\dot{G}_{\text{см}} f_{\text{г}} w} . \quad (6.26)$$

Считается, что воздух в пузырьке подчиняется уравнению состояния идеального газа $p = \rho_{\text{г}} \tilde{R}_{\text{г}} T_{\text{г}}$, после дифференцирования которого получим

$$\frac{d\rho_{\text{г}}}{dx} = \frac{1}{T_{\text{г}} \tilde{R}_{\text{г}}} \frac{dp}{dx} - \frac{\rho_{\text{г}}}{T_{\text{г}}} \frac{dT_{\text{г}}}{dx} . \quad (6.27)$$

Применяя первый закон термодинамики к пузырьку

$$\alpha_{\text{ж-г}} \pi D_{\text{п}}^2 (T_{\text{ж}} - T_{\text{г}}) d\tau = \frac{\pi D_{\text{п}}^3}{6} \rho_{\text{г}} di_{\text{г}} - V_{\text{п}} dp , \quad \text{найдем, что}$$

$$\frac{dT_{\text{г}}}{dx} = \left(\frac{6\alpha_{\text{ж-г}} (T_{\text{ж}} - T_{\text{г}})}{\rho_{\text{г}} w D_{\text{п}}} + \frac{1}{\rho_{\text{г}}} \frac{dp}{dx} \right) / c_{\text{пг}} . \quad (6.28)$$

Приравняв (6.26) и (6.27) с учетом (6.28), будем иметь:

$$\left(\frac{\rho_{\Gamma} F_C^2}{\dot{G}_{CM} f_{\Gamma} w} + \frac{1}{T_{\Gamma} c_p} - \frac{1}{T_{\Gamma} \tilde{R}_{\Gamma}} \right) \frac{dp}{dx} = \frac{\rho_{\Gamma}}{f_{\Gamma}} \frac{dF_C}{dx} - \frac{\rho_{\Gamma} F_C \tau_w \pi D_C}{\dot{G}_{CM} f_{\Gamma} w} - \frac{6\alpha_{\text{ж-}\Gamma} (T_{\text{ж}} - T_{\Gamma})}{T_{\Gamma} w D_{\Pi} c_{p\Gamma}}. \quad (6.29)$$

Так как $\frac{1}{T_{\Gamma} - c_{p\Gamma}} = \frac{k_{\Gamma} - 1}{a_{\Gamma}^2}$, $\frac{1}{T_{\Gamma} \tilde{R}_{\Gamma}} = \frac{k_{\Gamma}}{a_{\Gamma}^2}$, а $\dot{G}_{CM} = \rho_{CM} F_C w$, где $a_{\Gamma}^2 = k_{\Gamma} \tilde{R}_{\Gamma} T_{\Gamma}$;

$\rho_{CM} = \frac{\rho_{\Gamma} \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\Gamma} + \dot{G}_{\Gamma} (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}) / \dot{G}_{CM}}$, то (6.29) перепишется в окончательном виде:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{\left(M^2 - \frac{\rho_{\Gamma} F_C}{\rho_{CM} f_{\Gamma}} \right)} \left[\frac{6\alpha_{\text{ж-}\Gamma} (T_{\text{ж}} - T_{\Gamma}) (k_{\Gamma} - 1) M^2}{w D_{\Pi}} + \frac{w \rho_{\Gamma} F_C \tau_w \pi D_C}{\dot{G}_{CM} f_{\Gamma}} - \frac{\rho_{\Gamma} w^2}{f_{\Gamma}} \frac{dF_C}{dx} \right], \quad (6.30)$$

где $M = w/a_{\Gamma}$.

Для адиабатического канала

$\dot{I}_{CM0}^* = \dot{G}_{\Gamma 0} i_{\Gamma 0} + \dot{G}_{\text{ж}0} i_{\text{ж}0} + \dot{G}_{CM} \frac{w_0^2}{2} = const$, тогда температуру жидкости в любом

сечении канала найдем из выражения

$$T_{\text{ж}} = \left(\dot{I}_{CM0}^* - \dot{G}_{\Gamma 0} i_{\Gamma} - \dot{G}_{CM} \frac{w^2}{2} \right) / (\dot{G}_{\text{ж}0} c_{p\text{ж}}) + 273,16. \quad (6.31)$$

Определив dp/dx из (6.30), далее найдем dw/dx из (6.21), dT_{Γ}/dx из (6.28).

Из дифференциального уравнения состояния идеального газа (6.27) можно было бы определить $d\rho_{\Gamma}/dx$, а затем и ρ_{Γ} , но лучше плотность газа находить из выражения $\rho_{\Gamma} = p / (\tilde{R}_{\Gamma} T_{\Gamma})$.

Численное решение рассмотренной задачи реализовано в программе "BUBBLE3", обратная задача решена в программе "BUBBLE4" (приложение №5).

Часто при исследовании газожидкостных потоков используют формулу Вуда [22], которая позволяет оценить скорость распространения звука, а следовательно, и возникновение кризисных явлений в таких средах. Получим формулу Вуда.

Масса смеси равна сумме масс компонентов

$$G_{CM} = V_{\Gamma} \rho_{\Gamma} + V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}. \quad (6.32)$$

Разделим (6.32) на V_{CM} и введем понятие объемной доли газа $\alpha = V_{\Gamma} / V_{CM}$, тогда

$$\rho_{CM} = \alpha \rho_{\Gamma} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ж}}. \quad (6.33)$$

Возьмем от (6.33) производную по давлению

$$\frac{d\rho_{CM}}{dp} = (\rho_{\Gamma} - \rho_{\text{ж}}) \frac{d\alpha}{dp} + \alpha \frac{d\rho_{\Gamma}}{dp} + (1 - \alpha) \frac{d\rho_{\text{ж}}}{dp}. \quad (6.34)$$

Полагая, что в элементарном объеме смеси массы компонентов остаются неизменными, можно написать:

$$\frac{V_{\Gamma} \rho_{\Gamma}}{V_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}} = \frac{\alpha \rho_{\Gamma}}{(1 - \alpha) \rho_{\text{ж}}} = const. \quad (6.35)$$

После дифференцирования (6.35) найдем, что

$$d\alpha = \alpha(1-\alpha) \left(\frac{d\rho_{ж}}{\rho_{ж}} - \frac{d\rho_{г}}{\rho_{г}} \right), \text{ или}$$

$$\frac{d\alpha}{dp} = \alpha(1-\alpha) \left(\frac{1}{\rho_{ж}} \frac{d\rho_{ж}}{dp} - \frac{1}{\rho_{г}} \frac{d\rho_{г}}{dp} \right). \quad (6.36)$$

Подставим (6.36) в (6.34)

$$\frac{d\rho_{см}}{dp} = (\rho_{г} - \rho_{ж})\alpha(1-\alpha) \left(\frac{1}{\rho_{ж}} \frac{d\rho_{ж}}{dp} - \frac{1}{\rho_{г}} \frac{d\rho_{г}}{dp} \right) + \alpha \frac{d\rho_{г}}{dp} + (1-\alpha) \frac{d\rho_{ж}}{dp}. \quad (6.37)$$

Если считать, что $\frac{dp}{d\rho_{см}} = a_{см}^2$, $\frac{dp}{d\rho_{ж}} = a_{ж}^2$ и $\frac{dp}{d\rho_{г}} = a_{г}^2$, то выражение (6.37) можно

представить в виде

$$a_{см}^2 = \frac{a_{г}^2 a_{ж}^2 \rho_{г}}{\alpha a_{ж}^2 (\rho_{ж} - (\rho_{ж} - \rho_{г})\alpha) + (1-\alpha)\rho_{г} a_{г}^2}.$$

(6.38)

Формула (6.38) имеет предельные переходы, так при $\alpha=1$ $a_{см}=a_{г}$; если $\alpha=0$, то $a_{см}=a_{ж}$.

Взяв производную от (6.38) по α и приравняв ее нулю, найдем объемную долю газа α^* , при которой скорость звука в смеси

Рис. 6.1 минимального значения

$$\alpha^* = \frac{1 - \frac{\rho_{г} a_{г}^2}{\rho_{ж} a_{ж}^2}}{2 \left(1 - \frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \right)}. \quad (6.39)$$

Для случая, когда $\rho_{ж} a_{ж}^2 \gg \rho_{г} a_{г}^2$, будем иметь

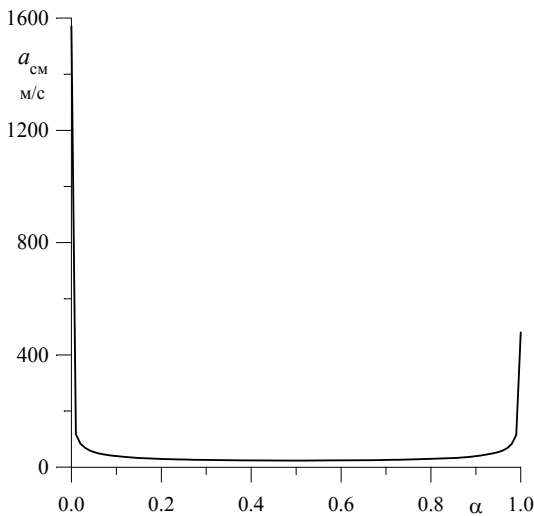
$$\alpha^* = \frac{1}{2 \left(1 - \frac{\rho_{г}}{\rho_{ж}} \right)}, \quad (6.40)$$

если $\rho_{ж} \gg \rho_{г}$, получим $\alpha^*=0,5$.

Результаты расчета зависимости $a_{см}=f(\alpha)$ по программе ASMB (приложение №5) представлены на рис.6.1.

6.3. Конденсация потока пузырьковой структуры - скачок конденсации

Из курса газодинамики известно, что при работе сопла Лавалья в нерасчетном режиме в расширяющейся части сопла возникает скачок уплотнения, в котором имеет место значительная потеря кинетической энергии. Рассматривая это явление в упрощенном виде, считают, что скачок прямой, а в



плоскости скачка имеет место разрыв параметров, определяющих движение газа.

При переходе через прямой скачок уплотнения поток становится дозвуковым, а статическое давление и температура возрастают. Естественно, что при создании энергетических систем и установок стараются, как правило, в процессе расширения газа не допускать таких режимов. Однако в процессе сжатия часто, наоборот, создают условия для возникновения скачков уплотнения (сверхзвуковые ступени компрессора), в других случаях скачок является неотъемлемой частью процесса (эжекторы, инжекторы). Так, в диффузоре инжектора, который можно назвать тепловым насосом, в процессе конденсации пузырьков пара давление в скачке может возрасти в 30 и более раз. В отличие от газовых сред, где толщина скачка порядка длины свободного пробега молекул, здесь, как показывают эксперименты, его протяженность значительна и в зависимости от режима составляет 20...30 мм. Повышение давления в скачке определяется гидравлическим сопротивлением регулирующего устройства на выходе из инжектора и растет с увеличением последнего, то есть за счет прикрытия вентиля давление за диффузором (инжектором) возрастает, а протяженность скачка уменьшается. При этом, как и в газовых средах, поток до скачка сверхзвуковой, а после - дозвуковой, что подтверждается независимостью давления перед скачком (по нашим опытам $p=0,038...0,040$ МПа) от степени прикрытия вентиля. Если вентиль полностью открыт, то скачок в диффузоре отсутствует и возникает за пределами инжектора в отводящем тракте. Чрезмерное прикрытие вентиля приводит к смещению переднего фронта скачка из цилиндрической части диффузора в коническую часть камеры смешения, что приводит к "гибели" скачка и срыву работы инжектора.

В СПбГТУ проф. В.А. Барилевичем был создан инжектор, работающий на перегретой воде, со степенью повышения давления $\pi^* = p_{ВЫХ}^* / p_{ВХ}^* = 2$, где $p_{ВЫХ}^*$ - давление воды за инжектором, $p_{ВХ}^*$ - давление горячей воды на входе в инжектор.

Рассмотрим процессы в скачке конденсации. Будем считать, что поток находится в термическом и механическом равновесии, а скачок расположен в цилиндрической части диффузора (в горле) и паровая фаза в скачке полностью конденсируется.

Запишем уравнение сохранения импульса

$$dI = pdF - \tau_w \pi D dx, \quad \text{где } I = \dot{G}w + pF \quad . \quad (6.41)$$

Для нашего случая

$$d(p + \rho w^2) = -\frac{\tau_w \pi D}{F} dx \quad . \quad (6.42)$$

Пренебрегая силами трения, после интегрирования (6.42) получим

$$p_1 + \rho_1 w_1^2 = p_2 + \rho_2 w_2^2 \quad . \quad (6.43)$$

С учетом уравнения сплошности

$$\rho_1 w_1 = \rho_2 w_2 \quad (6.44)$$

представим (6.43) в виде

$$\Delta p_{CK} = p_2 - p_1 = \rho_2 (w_1 w_2 - w_2^2), \quad (6.45)$$

где индекс “1” относится к параметрам смеси перед скачком а “2”- за скачком.

Определим, при каких условиях $\Delta p_{CK} = \Delta p_{CK.max}$. Взяв производную от (6.45) по w_2 и приравняв ее нулю, получим $w_2 = w_1/2$, тогда

$$\Delta p_{CK.MAX} = \rho_2 \frac{w_1^2}{4}. \quad (6.46)$$

Для выполнения условия (6.46) необходимо, согласно уравнению сплошности, чтобы $\rho_1 = \rho_2 / 2$, но

$$\rho_1 = \frac{\rho_1'' \rho_1'}{\rho_1'' + x_1 (\rho_1' - \rho_1'')}, \quad (6.47)$$

следовательно,

$$x_1 = \frac{\rho_1''}{(\rho_1' - \rho_1'')}. \quad (6.48)$$

Из уравнений сохранения энергии, импульса и расхода

$$\begin{cases} i_1 + \frac{w_1^2}{2} = i_1^* \\ p_1 + \rho_1 w_1^2 = \tilde{I}_1 \\ \rho_1 w_1 = \Phi \end{cases} \quad (6.49)$$

можно получить уравнения линии Фанно ($\Phi = \text{const}$)

$$i = i_1 + \frac{(v_1^2 - v^2)}{2} \Phi^2, \quad (6.50)$$

где $v = v' + x(v'' - v')$ – текущее значение удельного объема смеси;

$$x = \frac{2(i_1^* - i') - (\tilde{I}_1 - p)v'}{2(i'' - i') + \tilde{I}_1(v'' - v') - p(v'' - v')} - \text{степень сухости};$$

и линии Релея ($p + \rho w^2 = \text{const}$)

$$p = p_1 + (v_1 - v)\Phi^2. \quad (6.51)$$

На ударной волне должны одновременно удовлетворяться уравнения (6.50) и (6.51), то есть в $i-s$ диаграмме точки пересечения этих кривых определяют параметры потока до и после скачка. Точка на линии Фанно, где выполняется условие $\frac{d\Phi}{ds} = \infty$, характеризует критическое состояние потока ($M=1$). При переходе через эту точку вверх по кривой поток становится дозвуковым. Переход адиабатического потока из сверхзвукового состояния 1 в дозвуковое - 2 сопровождается увеличением энтропии. Обратный переход невозможен, так как в этом случае энтропия уменьшается (см. рис. 6.2).

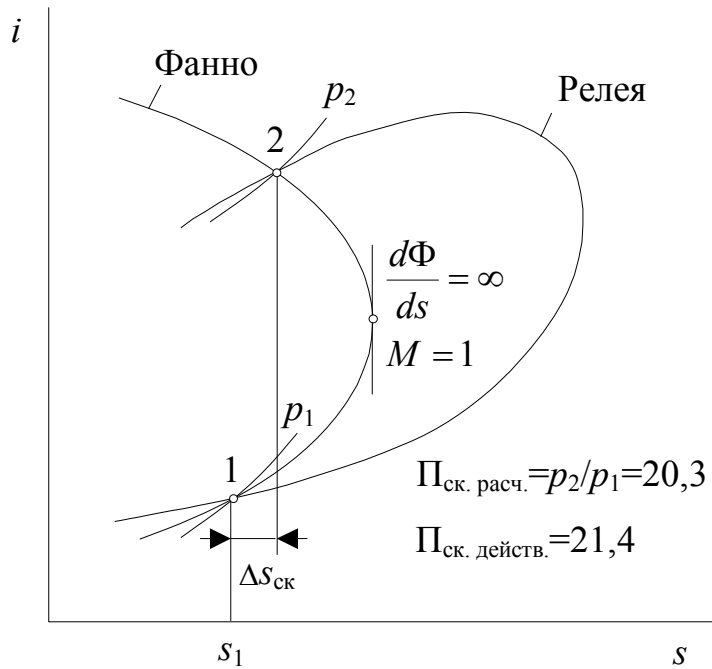


Рис. 6.2 Линии Фанно и Релея в i - s диаграмме.

Приращение энтропии в скачке при полной конденсации пара найдем по формуле

$$\Delta s_{СК} = (s'_2 - s'_1) - x_1 (s''_1 - s'_1). \quad (6.52)$$

Сравнение результатов расчета (см. программу “SCC1_FR”, приложение №5) с опытными данными, полученными при испытании инжектора, показывают их удовлетворительное совпадение, что, вероятно, свидетельствует о том, что реальный поток близок к равновесному. Так, для случая $p_1 = 3,6 \cdot 10^4$ Па, $t_1 = 73,36$ С, $\dot{G}_{CM} = 0,415$ кг/с, $d_r = 4,5 \cdot 10^{-3}$ м, получено: из расчета - $p_2 = 0,73$ МПа, $\rho_{CMI} = 487,97$ кг/м³, из опыта - $p_{2д} = 0,77$ МПа, $\rho_{CMIд} = 447$ кг/м³.

При определении критерия Маха скорость звука находилась как по термодинамической формуле (см. ф-лу 2.15), так и по формуле Вуда (6.38), которая в этих условиях, вероятно, более правильно отражает физическую суть явления.

Расчетная кривая $p=f(z)$ оказывается близкой к опытной, если считать, что диаметр пузырька в скачке конденсации изменяется по линейному закону

$$D_{\Pi} = D_{\Pi 1} \left(1 - \frac{z}{z_{СК}} \right), \text{ где } z_{СК} - \text{протяженность скачка.}$$

В этом случае расчет сводится к решению следующих уравнений :

$$x_1 = \frac{\rho_1''}{(\rho_1' - \rho_1'')} ; D_{\Pi} = D_{\Pi 1} \left(1 - \frac{z}{z_{СК}} \right) ;$$

$$\rho = \frac{\rho'' \rho'}{\rho'' + x(\rho' - \rho'')} ; \quad \alpha = x\rho / \rho'' ;$$

$$w = \rho_1 w_1 / \rho ; \quad \dot{n} = \frac{6\dot{G}_{CM} x_1}{\pi D_{\Pi 1}^3 \rho_1''} ; \quad (6.53)$$

$$x = \frac{\rho'' \pi D_{\Pi}^3 \dot{n}}{6\dot{G}_{CM}} ; \quad p = p_1 + \rho_1 w_1^2 \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho}\right) ,$$

где \dot{n} – поток пузырьков, 1/с; α - объемная доля пара.

При такой постановке задачи остается открытым вопрос : как определить текущее значение ρ'' . Здесь возможны два подхода - считать $\rho'' = f(p)$ или положить $\rho'' = \rho_1''$. В том и другом случае это не отразится на результатах расчета p , ρ и w , так как разность значений степени сухости пара мала: в этом можно убедиться, если выполнить расчеты по программам “SCCA” и “SCC2” (см. приложение №5).

Исследование теплообмена при кипении жидкостей [18] привело к созданию ряда физических моделей, позволяющих, в частности, определить и скорость роста пузырька. Рассмотрим в качестве примера модель Вора (J.N.Vohr) [18], и применим ее затем к процессу конденсации пузырька.

Теплота, подведенная от перегретой жидкости к поверхности пузырька за время $d\tau$, равна

$$dQ = 4\pi R_{\Pi}^2 \lambda_{ж} \left(\frac{dT}{dR} \right)_{R=R_{\Pi}} d\tau , \quad (6.54)$$

но с другой стороны,

$$dQ = \tilde{r} \rho_{\Pi}'' \frac{dV}{d\tau} d\tau = 4\pi \tilde{r} \rho_{\Pi}'' R^2 \frac{dR}{d\tau} d\tau . \quad (6.55)$$

Будем считать, что в тепловом пограничном слое жидкости толщиной $\delta = R_{\infty} - R_{\Pi}$ вокруг пузырька температура изменяется по квадратичному закону

$$T = T_{ж\infty} - (T_{ж\infty} - T_{ж}) \left(\frac{R_{\infty} - R}{R_{\infty} - R_{\Pi}} \right)^2 , \quad (6.56)$$

где R_{∞} - радиус, на котором $T = T_{ж\infty}$, тогда

$$\left(\frac{dT}{dR} \right)_{R=R_{\Pi}} = 2 \frac{T_{ж\infty} - T_{ж}}{R_{\infty} - R_{\Pi}} . \quad (6.57)$$

Подставим (6.57) в (6.54) и, приравняв (6.54) и (6.55), получим:

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{2\lambda_{ж}}{\tilde{r} \rho_{\Pi}''} \left(\frac{T_{ж\infty} - T_{ж}}{R_{\infty} - R_{\Pi}} \right) . \quad (6.58)$$

Если считать, что на границе пузырька (при $R = R_{\Pi}$) $\alpha = \infty$, то $T = T_{\Pi} = T_S$. Вор доказывает [18], что

$$R_{\infty} - R_{\Pi} = \frac{\tilde{r} \rho_{\Pi}'' R_{\Pi} \left(1 - (R_{\Pi KP} / R_{\Pi})^3\right)}{c_{рж} \rho_{ж} (T_{ж\infty} - T_S)} . \quad (6.59)$$

С учетом (6.59) уравнение (6.58) примет вид

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{2\lambda_{ж} c_{рж} \rho_{ж} (T_{ж\infty} - T_S)^2}{(\tilde{r} \rho''_{\Pi})^2 R_{\Pi} (1 - (R_{ПКР}/R_{\Pi})^3)}. \quad (6.60)$$

Отношение $R_{ПКР} / R_{\Pi}$ оценивается величиной $10^{-1} \dots 10^{-5}$, поэтому можно считать, что

$$\frac{dR}{d\tau} \approx \frac{2\lambda_{ж} c_{рж} \rho_{ж} (T_{ж\infty} - T_S)^2}{(\tilde{r} \rho''_{\Pi})^2 R} = \frac{2a_{ж}}{R} (Ja)^2, \quad (6.61)$$

где $Ja = \frac{c_{рж} \rho_{ж} \Delta T_{\Piж}}{\tilde{r} \rho''_{\Pi}}$ – критерий Якоба, характеризующий соотношение между

тепловым потоком, идущим на перегрев единицы объема жидкости и

объемной теплотой парообразования; $a_{ж} = \frac{\lambda_{ж}}{c_{рж} \rho_{ж}}$ – коэффициент

температуропроводности.

Для нашего случая можно написать

$$\frac{dD_{\Pi}}{dx} = 8\lambda_{ж} c_{рж} \rho_{ж} |T_{ж} - T_S| (T_{ж} - T_S) B_1 / ((\tilde{r} \rho''_{\Pi})^2 D_{\Pi} w), \quad (6.62)$$

где B_1 – коэффициент, учитывающий реальность процесса; w – скорость потока.

В программе “SCC2PI” (см. приложение №5 и рис.6.3) при расчете скачка конденсации используются уравнения (6.62) и (6.63)

$$\frac{dI}{dx} = p \frac{dF}{dx} - \tau_w \pi D. \quad (6.63)$$

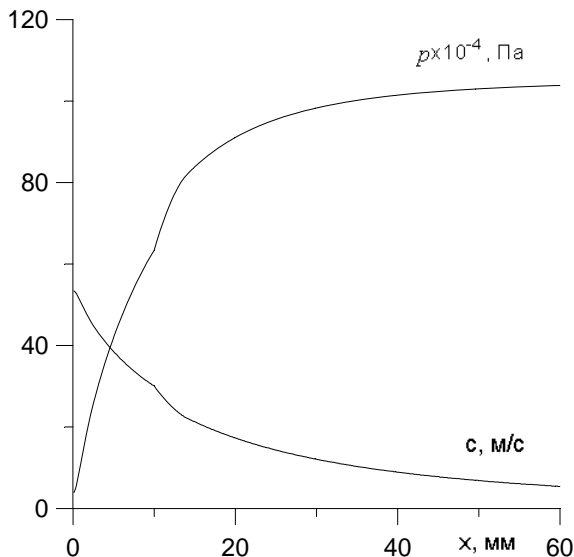


Рис. 6.3

Вместо (6.62) можно использовать уравнение

$$\frac{dD_{\Pi}}{dx} = -\frac{2\Delta j_{\Pi-ж}}{\rho''_{\Pi} w},$$

которое при $\rho''_{\Pi} = const$ получается из

$$dG_{\Pi} = d\left(\frac{\pi D_{\Pi}^3}{6} \rho''_{\Pi}\right) = -\pi D_{\Pi}^2 \Delta j_{\Pi-ж} d\tau.$$

6.4. Кавитационные явления при движении капельной жидкости в каналах переменного сечения

При движении холодной капельной жидкости в каналах с переменным поперечным сечением в случае понижения статического давления до давления

насыщения жидкости создаются условия для образования паровой фазы в виде пузырьков (кавитация). Однако при наличии в жидкости невидимых глазом пузырьков и твердых частиц кавитация может возникнуть и при давлениях, превышающих давление насыщенного пара. Рост содержания газа в жидкости приводит к аналогичному эффекту. Сказанное подтверждается и нашими опытами. На рис 6.4 показано распределение статического давления вдоль трубки Вентури, работающей на холодной водопроводной воде с температурой 4С. В нашем случае кавитация возникла при 0.2 ата, что отвечает температуре насыщения в 60С.

Расчет данного режима в одномерной постановке на основе уравнения движения

$$\dot{G} dw = -F dp - \tau_w \pi D dx$$

и сплошности $d(\rho_{ж} w f) = 0$ при $\rho_{ж} = const$, приведенных к виду

$$\frac{dp}{dx} = \left(\rho_{ж} w^2 \frac{dF}{dx} - \tau_w \pi D \right) \frac{1}{F},$$

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{\rho_{ж} w F} \left(F \frac{dp}{dx} + \tau_w \pi D \right)$$

показал, что в минимальном сечении трубки Вентури давление ($p_{min} = 0,187 \cdot 10^5$ Па) несколько ниже экспериментального из-за не учета в модели вскипания воды (см. Приложение №5, программу Vent_1t).

Как показывают визуальные наблюдения, возникновение пузырьков происходит у стенок канала в самом узком его сечении (горле). При низком противодавлении до конца расширяющейся части канала сохраняется двухслойная структура потока – пристенный двухфазный поток и жидкостное ядро. С увеличением противодавления протяженность двухфазной зоны со стороны дросселя начинает уменьшаться, но при этом давление в горле канала остается постоянным. Таким образом, возмущения давления не проходят вверх по потоку через область, где $p < p_s$, т.е. в узком сечении канала имеет место сверхзвуковое течение. При значительном дросселировании потока за каналом давление в горле p_T становится больше p_s и кавитация исчезает.

Схлопывание пузырьков в области повышенного давления приводит к значительным нагрузкам на стенки канала, которые при длительном воздействии (более 20 часов и скорости потока выше 40 метров в секунду [48]) могут разрушить поверхность канала.

Подобные явления возникают при обтекании капельным потоком лопастей гидротурбин, насосов, крыловидных профилей скоростных судов.

Решению данной проблемы посвящено большое количество работ, [44], [45], [47], [48] однако следует констатировать, что до настоящего времени не существует законченной теории кавитации.

Сложность решения задачи заключается в том, что еще не в полной мере изучено явление интенсивного образования новой фазы (парогазовых пузырьков) в объеме жидкости. В настоящее время в основе теории лежит положение, разработанное Я.Б.Зельдовичем [47] и Я.И.Френкелем [44],

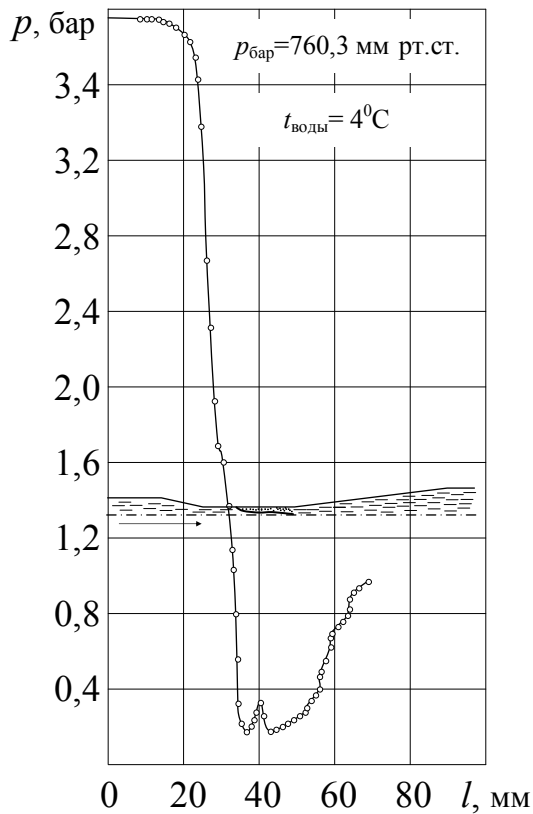


Рис.6.4

согласно которому число способных расти критических ядер новой фазы в единице объема в единицу времени определяется выражением

$$j_{\text{кр}} = \frac{dn}{d\tau} = A \exp\left(-\frac{W_{\text{кр}}}{kT_s}\right) \quad 1/(\text{м}^3\text{с}). \quad (6.64)$$

Однако вопрос теоретического определения численного значения множителя A остается открытым. М. Кронфельд [46], исследовавший упругость и прочность жидкостей, рекомендует принимать значение $10^{31} \quad 1/(\text{м}^3\text{с})$. Результаты теоретических расчетов Я.Б.Зельдовича и Я.И.Френкеля показали, что значение A может меняться от 10^{20} до $10^{42} \quad 1/(\text{м}^3\text{с})$. Согласно опытам В.П.Скрипова, исследовавшего поведение перегретых жидкостей [15], [16] для воды $A=10^{38} \quad 1/(\text{м}^3\text{с})$. При расчете явлений кавитации в водяных потоках часто полагают, что $J_{\text{кр}}=10^9 \quad 1/(\text{м}^3\text{с})$. Критическая работа образования пузырька $W_{\text{кр}}$ в

большом объеме жидкости складывается из работы образования полости, работы заполнения этой полости паром и работы образования свободной поверхности:

$$W_{\text{кр}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{пкр}}^3 p_{\text{ж}} - \frac{4}{3}\pi R_{\text{пкр}}^3 p_{\text{п}} + 4\pi R_{\text{пкр}}^2 \sigma,$$

или

$$W_{\text{кр}} = 4\pi R_{\text{пкр}}^2 \sigma - \frac{4}{3}\pi R_{\text{пкр}}^3 (p_{\text{п}} - p_{\text{ж}}), \quad (6.65)$$

где $p_{\text{ж}}$ – гидростатическое давление (давление окружающей жидкости), $p_{\text{п}}$ – упругость пара жидкости, $R_{\text{пкр}}$ – критический радиус парового пузырька.

При неустойчивом равновесии и паровой кавитации

$$R_{\text{пкр}} = \frac{2\sigma}{p_{\text{п}} - p_{\text{ж}}}. \quad (6.66)$$

Для парогазового пузырька уравнение статического равновесия имеет вид

$$p_{\text{ж}} = p_{\text{s}} + p_{\text{r}} - \frac{2\sigma}{R_{\text{п}}}. \quad \text{Если } p_{\text{ж}} < p_{\text{s}} + p_{\text{r}} - \frac{2\sigma}{R_{\text{п}}}, \text{ то пузырек растет, в противном}$$

случае – сжимается. Подставляя (6.66) в (6.65), получим

$$W_{\text{кр}} = \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3}{(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}})^2} \text{ Дж}. \quad (6.67)$$

Теперь (6.64) с учетом (6.67) примет вид

$$J_{\text{кр}} = A \exp\left(-\frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3}{(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}})^2 k T_s}\right). \quad (6.68)$$

Разрыв жидкости происходит при появлении первого пузырька с радиусом больше критического ($R_{\text{п}} \geq R_{\text{пкр}}$). Разрешая (6.68) относительно давления p и полагая, что $p_{\text{ж}}=z$, где z – прочность жидкости, определим теоретическую прочность жидкости

$$z = p_{\text{ж}} = p_{\text{п}} - \left(\frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3}{k T_s \ln \frac{A}{J_{\text{кр}}}}\right)^{0,5} \text{ Па.} \quad (6.69)$$

При значениях $T=293\text{К}$, $p_s=2350$ Па, $\sigma=7,35 \cdot 10^{-2}$ н/м, $A=10^{38}$ 1/(м³с), $R_{\text{пкр}}=10^{-9}$ м, $J_{\text{до}}=10^9$ 1/(м³с), по формуле (6.69) получаем: $z=-154,3 \cdot 10^6$ Па.

Растягивающее напряжение, при котором наступает разрыв жидкости, можно определить и из выражения $p_{\text{ж}} = p_s + p_{\text{г}} - \frac{2\sigma}{R_{\text{п}}}$, при этом получается

значение $p_{\text{ж}}=-147 \cdot 10^6$ Па. Так как $\sigma=f(T)$, а $z \sim \sigma^3/T_s$, то важно знать зависимость $z=f(T)$. Анализ литературных источников показывает, что наиболее достоверными являются экспериментальные данные, полученные Л.Бриггсом для воды [45], и представленные на рис.6.5. Результаты получены с помощью стеклянной открытой с обоих концов трубки, вращавшейся в горизонтальной плоскости. До начала опытов трубка опускалась в кипящую воду, что исключало наличие пузырьков и обеспечивало условие $\frac{z_{\text{пов}}}{z_{\text{объема}}} = 1$, при

котором краевой угол смачивания равен нулю. Объемная прочность определялась по разрыву жидкости на оси вращения в поле центробежных сил. Сравнение результатов расчета с опытными данными, как видим, показывает, что реальная прочность воды при $T=293\text{К}$ более чем в пять раз меньше теоретической. С ростом температуры из-за ослабления межмолекулярных связей прочность воды уменьшается. Работа образования критического зародыша новой фазы на плоской поверхности равна или меньше работы при гомогенном образовании зародыша в большом объеме. В этом случае $W_{\text{кр}}$ (см. формулу 6.67) необходимо умножить на функцию $f(\theta) = \frac{1}{4}(1 + \cos \theta)^2(2 - \cos \theta)$,

где θ - краевой угол (см. рис.). При абсолютном смачивании жидкостью поверхности $\theta=0$, $f(\theta)=1$. Если поверхность абсолютно не смачиваемая, то $\theta=180^\circ$, $f(\theta)=0$, $W_{\text{кр}}=0$. Отметим, что работа образования критического зародыша на впадине будет меньше, чем на плоской поверхности и зависит от геометрической формы впадины (для впадины типа “ласточкин хвост” она

будет минимальной), поэтому наиболее вероятно возникновение пузырьков на микротрещинах.

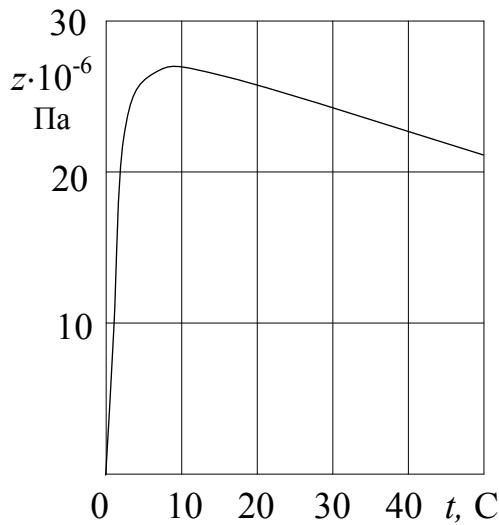


Рис. 6.5

При рассмотрении роста пузырька в зависимости от разности давлений внутри пузырька и в объеме жидкости используют уравнение Релея, которое позволяет оценивать вклад инерционных, поверхностных и вязкостных сил в процесс роста пузырька. Получим уравнение Релея для вязкой жидкости. В сферической системе координат уравнение сплошности имеет вид (см. рис.)

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u_r r^2) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (r u_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \psi} (r u_\psi) = 0. \quad (6.70)$$

Если скорости частиц зависят только от радиуса, уравнение приводится к виду

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial}{\partial r} (ur^2) = 0 \quad (6.71)$$

для сжимаемой жидкости и

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ur^2) = 0 \quad (6.72)$$

для несжимаемой ($\rho = \text{const}$).

Интегрируя (6.72), получим

$$ur^2 = u_\pi R_\pi^2 = \text{const}.$$

С учетом выражения для скорости перемещения границы пузырька

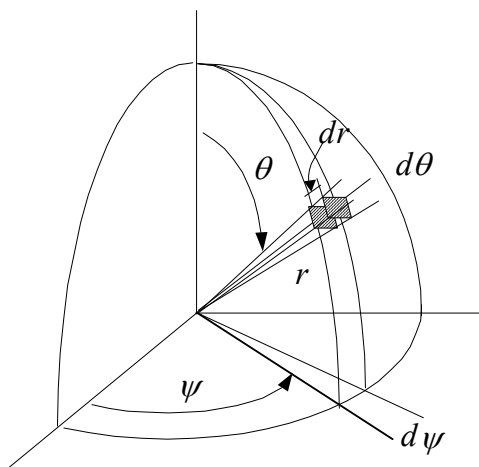
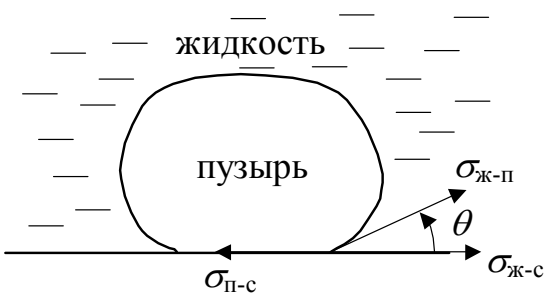
$$u_\pi = \frac{d\dot{R}_\pi}{d\tau}$$

получаем закон изменения радиальной скорости жидкости

$$u(r, \tau) = \frac{R_\pi^2 \dot{R}_\pi}{r^2}, \quad (6.73)$$

т.е. при $r \rightarrow \infty, u(r, \tau) \rightarrow 0$; при $r \rightarrow 0, u(r, \tau) \rightarrow \infty$.

Равенство $ur^2 = u_\pi R_\pi^2$ отражает условие



сохранения объемного расхода. Условие сохранения массового расхода внутри пузырька и вне его (в окружающей жидкости) дает уравнение $4\pi R_{\Pi}^2 u_{\Pi} \rho_{\Pi} = 4\pi r^2 u_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}$, откуда

$$u_{\text{ж}} = \frac{R_{\Pi}^2 \dot{R}_{\Pi} \rho_{\Pi}}{r^2 \rho_{\text{ж}}}.$$

Запишем уравнение движения вязкой жидкости в сферической системе координат, когда искомые величины зависят от τ и r :

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial p}{\partial r} + v_{\text{ж}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2u}{r^2} \right). \quad (6.74)$$

Подставляя в (6.74) значения производных $\partial u / \partial r$ и $\partial u / \partial \tau$ с учетом выражения (6.73), получим

$$\frac{1}{r^2} (2R_{\Pi} \dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi}^2 \ddot{R}_{\Pi}) - \frac{2R_{\Pi}^4 \dot{R}_{\Pi}^2}{r^5} = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial p}{\partial r} + v_{\text{ж}} \left(\frac{6R_{\Pi}^2 \dot{R}_{\Pi}}{r^4} - \frac{4R_{\Pi}^2 \dot{R}_{\Pi}}{r^4} - \frac{2R_{\Pi}^2 \dot{R}_{\Pi}}{r^4} \right),$$

или

$$\frac{1}{r^2} (2R_{\Pi} \dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi}^2 \ddot{R}_{\Pi}) - \frac{2R_{\Pi}^4 \dot{R}_{\Pi}^2}{r^5} = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (6.75)$$

Проинтегрируем (6.75) по радиусу от $r=\infty$ до $r=R_{\Pi}$

$$\int_{r=\infty}^{r=R_{\Pi}} \frac{1}{r^2} (2R_{\Pi} \dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi}^2 \ddot{R}_{\Pi}) dr - \int_{r=\infty}^{r=R_{\Pi}} \frac{2R_{\Pi}^4 \dot{R}_{\Pi}^2}{r^5} dr = -\frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \int_{r=\infty}^{r=R_{\Pi}} \frac{\partial p}{\partial r} dr;$$

$$2\dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi} \ddot{R}_{\Pi} - \frac{1}{2} \dot{R}_{\Pi}^2 = \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} (p_{\infty} - p_{\Pi}(R_{\Pi})).$$

В окончательном виде будем иметь:

$$R_{\Pi} \ddot{R}_{\Pi} + \frac{3}{2} \dot{R}_{\Pi}^2 = \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} (p_{\text{ж}\infty} - p_{\Pi}). \quad (6.76)$$

Полученное уравнение второго порядка называется уравнением Релея.

Отметим, что хотя в исходном уравнении (6.74) вязкостные силы присутствуют, в данной постановке задачи, когда $u(r, \tau)$, в уравнении (6.76) их нет.

Анализ уравнения (6.75) показывает, что при $r > R_{\Pi}$ в жидкости на расстоянии r_* , где $\partial p / \partial r = 0$, давление в жидкости достигает максимального значения. При $r = r_*$ из (6.75) можно получить

$$r_*^3 (2R_{\Pi} \dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi}^2 \ddot{R}_{\Pi}) = 2R_{\Pi}^4 \dot{R}_{\Pi}^2,$$

откуда

$$r_* = R_{\Pi} \left(\frac{2\dot{R}_{\Pi}^2}{2\dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi} \ddot{R}_{\Pi}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (6.76a)$$

Для того, чтобы r_* было больше R_{Π} необходимо при $\ddot{R}_{\Pi} < 0$ выполнение

неравенства $2\dot{R}_{\Pi}^2 + R_{\Pi} \ddot{R}_{\Pi} > 0$. Отметим, что при $R = R_{\Pi} / R_{\Pi 0} < 0,2$ $r_* / R_{\Pi} \rightarrow 1,587$.

Максимальное давление в жидкости при $r = r_*$ определим из (6.77) [30]

$$p_{\text{ж max}} = \frac{3}{4} \rho_{\text{ж}} \frac{R_{\text{п}}}{r_*} (2\dot{R}_{\text{п}}^2 + R_{\text{п}} \ddot{R}_{\text{п}}) + p_{\text{ж}\infty}. \quad (6.77)$$

Рассмотрим схлопывающийся пузырь, радиус которого изменяется от $R_{\text{п}0}$ до $R_{\text{п}}$ ($R_{\text{п}} < R_{\text{п}0}$). Элементарную кинетическую энергию жидкости, имеющей форму сферического кольца радиуса r толщиной dr , можно записать в виде

$$dE = \rho_{\text{ж}} \frac{u^2}{2} 4\pi r^2 dr. \quad (6.78)$$

С учетом (6.73) уравнение (6.78) примет вид

$$dE = 2\rho_{\text{ж}} \frac{R_{\text{п}0}^4 \dot{R}_{\text{п}0}}{r^4} \pi r^2 dr. \quad (6.79)$$

Интегрируя (6.79) в пределах от $R_{\text{п}0}$ до $R_{\text{п}}$, получим

$$\Delta E = 2\rho_{\text{ж}} \pi R_{\text{п}}^3 \dot{R}_{\text{п}}^2 \left(\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{п}0}} - 1 \right). \quad (6.80)$$

Элементарная работа образования объема пузырька при $\Delta p = \text{const}$ равна $dL_{\text{п}} = -\Delta p dV_{\text{п}}$. В интегральной форме будем иметь

$$L_{\text{п}} = \Delta p \frac{4}{3} \pi R_{\text{п}0}^3 \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^3}{R_{\text{п}0}^3} \right). \quad (6.81)$$

Работа образования пузырька равна убыли кинетической энергии, т.е. $L_{\text{п}} = -\Delta E$, поэтому приравнявая (6.80) и (6.81), получим

$$2\rho_{\text{ж}} \pi R_{\text{п}}^3 \dot{R}_{\text{п}}^2 \left(1 - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{п}0}} \right) = \Delta p \frac{4}{3} \pi R_{\text{п}0}^3 \left(1 - \frac{R_{\text{п}}^3}{R_{\text{п}0}^3} \right),$$

откуда находим скорость перемещения границы пузырька во время схлопывания при изменении его радиуса от $R_{\text{п}0}$ до $R_{\text{п}}$

$$\dot{R}_{\text{п}} = \left(\frac{2\Delta p R_{\text{п}0}^3}{3\rho_{\text{ж}} R_{\text{п}}^3} \left(\frac{1 - \frac{R_{\text{п}}^3}{R_{\text{п}0}^3}}{1 - \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{п}0}}} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (6.82)$$

Выражая (6.82) в безразмерном виде

$$\frac{dR}{d\tau} = \frac{1}{R_{\text{п}0}} \left(\frac{2\Delta p}{3\rho_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{R^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{1 - R^3}{1 - R} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.83)$$

где $R = R_{\text{п}}/R_{\text{п}0}$ - безразмерный текущий радиус пузырька, определим после взятия интеграла время схлопывания пузырька

$$\tau = R_{\text{п}0} \left(\frac{3\rho_{\text{ж}}}{2\Delta p} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{R=0}^{R=1} R^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1 - R}{1 - R^3} \right)^{\frac{1}{2}} dR. \quad (6.84)$$

Вычисление определенного интеграла выполним численным методом, например, по формуле трапеций (см. приложение №5, программа "TAU_BUBBLE").

Используя при выводе уравнения Релея закон сохранения количества движения в общем виде получим

$$\left[R_{\text{п}} \frac{d^2 R_{\text{п}}}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} \right)^2 \right] \rho_{\text{ж}} + \frac{2\sigma}{R_{\text{п}}} + \frac{4\mu_{\text{ж}}}{R_{\text{п}}} \frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = (p_{\text{п}} - p_{\text{ж}}). \quad (6.85)$$

Уравнение позволяет оценивать вклад инерционных, поверхностных и вязкостных сил в процесс роста пузырька. При размерах пузырька $R_{\text{п}} \approx R_{\text{пкр}}$ существенными являются силы поверхностного натяжения $\frac{2\sigma}{R_{\text{п}}}$. При $R_{\text{п}} \gg R_{\text{пкр}}$

уравнение может быть сведено к виду

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{2}{3} \left(\frac{p_{\text{п}} - p_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.86)$$

так как $\frac{3}{2} \left(\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} \right)^2 \gg R_{\text{п}} \frac{d^2 R_{\text{п}}}{d\tau^2}$, а $\frac{2\sigma}{R_{\text{п}}}$ мало.

Обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка (6.85) может быть представлено в виде двух уравнений первого порядка и решено численным методом

$$\frac{dW_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{1}{R_{\text{п}} \rho_{\text{ж}}} \left[(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}}) - \left(\frac{3}{2} W_{\text{п}}^2 \rho_{\text{ж}} + \frac{2\sigma}{R_{\text{п}}} + \frac{4\mu_{\text{ж}}}{R_{\text{п}}} W_{\text{п}} \right) \right],$$

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = W_{\text{п}}$$

(реализовано в программах “CAV_1” и “CAV_2”, которые позволяют определить скорость движения поверхности пузырька $W_{\text{п}} = f(\tau)$ и $R_{\text{п}} = \varphi(\tau)$ при его росте и “схлопывании”- в этом случае необходимо в первом уравнении изменить знаки на обратные у $p_{\text{п}}$ и $p_{\text{ж}}$ (см. приложение №5)).

Расчеты показывают, что при перепаде давления между жидкостью и пузырьком равным $0,4 \cdot 10^5$ Па пузырек уменьшает свой диаметр с 20 мм до 0,972 мм за $2,885 \cdot 10^{-3}$ сек, при этом скорость границы пузырька увеличивается от 0,0 до 443,6 м/с, а энергия жидкости окружающей пузырек становится равной 0,141 Дж. Максимальное значение кинетической энергии 0,165 Дж имеет место на радиусе 1,83 мм, скорости 65,7 м/с и времени $2,863 \cdot 10^{-3}$ сек.

По мере увеличения размера пузырька и замедления скорости его роста, определяющим фактором дальнейшего роста становится подвод теплоты к нему от окружающей жидкости. На этом этапе используются уравнения вида

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = J_a \left(\frac{a_{\text{ж}}}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (6.87)$$

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{2a_{\text{ж}}}{R_{\text{п}}} J_a^2, \quad (6.88)$$

где $J_a = \frac{c_{pж} \rho_{ж} (T_{ж} - T_{п})}{\tilde{r} \rho_{п}}$ - критерий Якоба.

Однако в большинстве случаев представляет интерес образование новой фазы при течении капельной жидкости около поверхности обтекаемого тела, когда вблизи стенок, благодаря вихревой структуре потока, имеет место локальное понижение давления в вихрях, что создает условия значительного локального перегрева жидкости (на фоне незначительного термодинамического перегрева) и интенсивного образования паровой фазы. С этих позиций возникновение новой фазы было рассмотрено А.А.Столяровым и Н.Б.Кондуковым Н.Б. [49], но в целом этот вопрос до настоящего времени еще недостаточно изучен. Остается открытым и вопрос роста и сжатия парогазовых пузырьков в реальных жидкостях, содержащих растворенный газ.

Рассмотрим рост парогазового пузырька в капельном потоке, содержащем растворенный газ. Введем понятия концентрации газа в воде $C_r = \frac{G_r}{V_{H_2O}}$.

Поступление газа к поверхности пузыря обусловлено процессами диффузии и конвективного переноса концентрации:

$$\vec{j}_r = -D \left(\frac{dC_r}{dr} \right)_{r=R_n} + C_r \frac{dR_n}{d\tau}. \quad (6.89)$$

Будем считать, что конвективная составляющая много меньше диффузионной, тогда плотность потока газа составит

$$\vec{j}_r = -D \left(\frac{dC_r}{dr} \right)_{r=R_n}. \quad (6.90)$$

Скорость изменения массы газа в пузырьке

$$\frac{dG_r}{d\tau} = \pi D_n^2 j_r = -\pi D_n^2 D \left(\frac{dC_r}{dr} \right)_{r=R_n}. \quad (6.91)$$

Так как $G_r = \frac{\pi D_n^3}{6} \rho_r$, то $\frac{dG_r}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\pi D_n^3}{6} \rho_r \right) = \rho_r \frac{\pi D_n^2}{2} \frac{dD_n}{d\tau} + \frac{\pi D_n^3}{6} \frac{d\rho_r}{d\tau}$.

Можно показать, что $\frac{dD_n}{d\tau} \gg \frac{d\rho_r}{d\tau}$, тогда

$$\frac{dG_r}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{\pi D_n^3}{6} \rho_r \right) = \frac{\pi}{2} \rho_r D_n^2 \frac{dD_n}{d\tau}. \quad (6.92)$$

Приравнявая (6.91) и (6.92), получим выражение для скорости роста газового пузырька

$$\frac{dR_n}{d\tau} = -\frac{D}{\rho_r} \left(\frac{dC_r}{dr} \right)_{r=R_n}. \quad (6.93)$$

Из уравнения теплового баланса, записанного в предположении, что вся подведенная теплота идет на парообразование:

$$q = \tilde{r}j = -\lambda_{\text{ж}} \left(\frac{dt_{\text{ж}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}}$$

определим скорость роста парового пузырька

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = -\frac{\lambda_{\text{ж}}}{\tilde{r}\rho_{\text{п}}''} \left(\frac{dt_{\text{ж}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} . \quad (6.94)$$

Суммируя воздействие потоков массы и теплоты, запишем скорость роста парогазового пузырька

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = - \left[\frac{D}{\rho_{\text{г}}} \left(\frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} + \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\tilde{r}\rho_{\text{п}}''} \left(\frac{dt_{\text{ж}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} \right], \quad (6.95)$$

где \tilde{r} - удельная теплота парообразования.

Для определения градиента концентрации $(dC_{\text{г}}/dr)_{r=R_{\text{п}}}$ воспользуемся дифференциальным уравнением массопереноса i -го компонента

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + (\vec{w} \cdot \nabla) C_i = D \nabla^2 C_i . \quad (6.96)$$

Полагая $\frac{\partial C_i}{\partial \tau} = 0$, $\vec{w} = 0$ получим уравнение Лапласа $\nabla^2 C_i = 0$, которое в сферической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right) = 0 . \quad (6.97)$$

Первое интегрирование дает $\frac{dC_{\text{г}}}{dr} = \frac{C_1}{r^2}$, (6.98)

откуда $C_{\text{г}} = -\frac{C_1}{r} + C_2$. (6.99)

Определим константы интегрирования из граничных условий

при $r=\infty$: $C_2 = C_{\text{г}\infty}$,

при $r=R_{\text{п}}$: $C_1 = (C_{\text{г}\infty} - C_{\text{г}}|_{r=R_{\text{п}}})R_{\text{п}}$. Полагая $C_{\text{г}}|_{r=R_{\text{п}}} = \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{пр}}}$ и подставив C_1 и C_2 в

(6.99), получим закон изменения концентрации газа в жидкости вокруг пузырька

$$C_{\text{г}} = -\frac{\left(C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{пр}}} \right) R_{\text{п}}}{r} + C_{\text{г}\infty}, \quad (6.100)$$

где $p_{\text{г}}$ - парциальное давления газа в пузырьке;

$T_{\text{пр}}$ - температура парогазовой смеси в пузырьке.

Продифференцировав (6.100) по r при $r=R_{\text{п}}$ или подставив C_1 в (6.98) при $r=R_{\text{п}}$, получим

$$\left(\frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} = \frac{C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{пр}}}}{R_{\text{п}}} . \quad (6.101)$$

Из уравнения энергии для жидкости

$$\frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial \tau} + (\vec{w}_{\text{ж}} \cdot \nabla) t_{\text{ж}} = a_{\text{ж}} \nabla^2 t_{\text{ж}} \quad (6.102)$$

при $\frac{\partial t_{\text{ж}}}{\partial \tau} = 0$, $\vec{w}_{\text{ж}} = 0$ будем иметь

$$\nabla^2 t_{\text{ж}} = 0. \quad (6.103)$$

Решение этого уравнения с учетом граничных условий дает

$$t_{\text{ж}} = -\frac{(t_{\text{ж}\infty} - t_s(p_{\text{п}}))R_{\text{п}}}{r} + t_{\text{ж}\infty}, \quad (6.104)$$

$$\left(\frac{dt_{\text{ж}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} = -\frac{t_{\text{ж}\infty} - t_s(p_{\text{п}})}{R_{\text{п}}}. \quad (6.105)$$

Подставляя (6.101) и (6.105) в (6.95), получим

$$\frac{dR_{\text{п}}}{d\tau} = -\frac{1}{R_{\text{п}}} \left[\frac{D}{\rho_{\text{г}}} \left(C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{г}}} \right) + \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\tilde{r}\rho_{\text{п}}} (t_{\text{ж}\infty} - t_s(p_{\text{п}})) \right]. \quad (6.106)$$

Рассматривая пузырек, движущийся в потоке жидкости со скоростью $w_{\text{п}}$, преобразуем (6.106) к виду

$$\frac{dR_{\text{п}}}{dx} = -\frac{1}{w_{\text{п}}R_{\text{п}}} \left[\frac{D}{\rho_{\text{г}}} \left(C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{г}}} \right) + \frac{\lambda_{\text{ж}}}{\tilde{r}\rho_{\text{п}}} (t_{\text{ж}\infty} - t_s(p_{\text{п}})) \right], \quad (6.107)$$

которое отражает изменение радиуса пузырька вдоль продольной координаты канала. Уменьшение концентрации газа в воде вдоль канала обусловлено потоками газа из жидкости в пузырьки. Для элементарного объема можно написать:

$$\beta \left(C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{г}}} \right) \pi D_{\text{п}}^2 n_{\text{в}} F_{\text{к}} dx = \left(\frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4} - f_{\text{п}} \right) w_{\text{ж}} dc_{\text{г}}, \quad (6.108)$$

где $D_{\text{п}}$ и $F_{\text{к}}$ - диаметр и площадь поперечного сечения канала;

$f_{\text{п}} = \frac{\dot{G}_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} w_{\text{п}}}$ - площадь поперечного сечения занятая потоком пузырей;

β - коэффициент массопереноса, м / с.

Так как $\beta \left(C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{г}}} \right) = -D \left(\frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}}$, тогда

$$\frac{dC_{\text{г}\infty}}{dx} = - \frac{\left(D \left(\frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} \pi D_{\text{п}}^2 n_{\text{в}} F_{\text{к}} \right)}{\left(\frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4} - f_{\text{п}} \right) w_{\text{ж}}}, \quad (6.109)$$

где $\left(\frac{dC_{\text{г}}}{dr} \right)_{r=R_{\text{п}}} = \frac{C_{\text{г}\infty} - \frac{p_{\text{г}}}{R_{\text{г}}T_{\text{г}}}}{R_{\text{п}}}$.

Возможен и другой подход для определения $\frac{dC_{\text{г}\infty}}{dx}$.

Используя критериальное уравнение $Sh = \frac{\beta D_{\text{п}}}{D} = 2 + 0.6 \text{Re}_{\text{п}}^{0.5} \text{Pr}^{0.33}$ и полагая процесс переноса газа на молекулярном уровне, получим $\beta = \frac{2D}{D_{\text{п}}}$, тогда

$$\frac{dC_{\text{г}\infty}}{dx} = - \left(\frac{j\pi D_{\text{п}}^2 n_{\text{в}} F_{\text{к}}}{\left(\frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4} - f_{\text{п}}\right) w_{\text{ж}}} \right) = - \left(\frac{2\pi D_{\text{п}} \dot{n} D (C_{\text{г}\infty} - C_{\text{п}})}{\left(\frac{\pi D_{\text{к}}^2}{4} - f_{\text{п}}\right) w_{\text{ж}}^2} \right), \quad (6.109\text{а})$$

где $C_{\text{п}} = C_{\text{г}\infty} \frac{j}{\beta}$ - концентрация газа в пузырьке; \dot{n} - поток пузырей вдоль канала.

Изменение температуры жидкости определим из дифференциального уравнения

$$\frac{dt_{\text{ж}}}{dx} = - \frac{1}{\dot{G}_{\text{ж}} c_{\text{рж}}} \left[\alpha \pi D_{\text{п}}^2 n_{\text{в}} F_{\text{к}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{п}}) + \tilde{r} \left(\frac{d\dot{G}_{\text{п}}}{dx} \right)_{r=R_{\text{п}}} \right], \quad (6.109\text{в})$$

где $\dot{G}_{\text{ж}}$ и $\dot{G}_{\text{п}}$ - расход через канал жидкостной и паровой составляющих соответственно; $\alpha = \frac{2\lambda_{\text{ж}}}{D_{\text{п}}}$ - коэффициент теплоотдачи.

Обобщая изложенное, следует констатировать, что задача о кавитации может быть решена лишь приближенно.

Ниже приводятся уравнения, позволяющие выполнить расчет стационарного движения кавитирующей воды в трубке Вентури в одномерной постановке. Будем полагать, что спонтанное образование новой фазы носит объемный характер, а интенсивность образования критических ядер определяется выражением

$$J_{\text{кр}} = A \exp\left(-\frac{W_{\text{кр}}}{kT_{\text{с}}}\right), \quad (6.110)$$

где $W_{\text{кр}} = 4\pi R_{\text{пкр}}^3 \left(\frac{\sigma}{R_{\text{пкр}}} + \frac{\Delta p_{\text{кр}}}{3} \right) \psi$, Дж; $A = 10^{38} 1/(\text{м}^3 \text{с})$;

$$\Delta p_{\text{кр}} = (p_{\text{с}} - p_{\text{ж}})_{\text{кр}} \quad (6.111)$$

или $W_{\text{кр}} = \frac{16}{3} \frac{\pi \sigma^3}{(p_{\text{п}} - p_{\text{ж}})_{\text{кр}}^2} \psi$ Дж.

Полагаем, что при достижении определенного значения $\Delta p_{\text{кр}}$ в жидкости образуются паровые пузырьки критического радиуса $R_{\text{пкр}} = 10^{-9}$ м. Значение коэффициента ψ подбирается так, чтобы $J_{\text{кр}} \geq 10^9 1/(\text{м}^3 \text{с})$ (рекомендуемая величина при расчете кавитационных потоков).

Массу пузырьков, образовавшихся в элементарном объеме Fdl в единицу времени найдем с учетом числа $J_{\text{кр}}$ и критического диаметра пузырька

$$\dot{G}_{\text{пкр}} = \dot{J}_{\text{кр}} \frac{\pi D_{\text{пкр}}^3}{6} \rho_{\text{п}} F dl, \text{ кг/с.} \quad (6.112)$$

где $F dl = \text{const}$ – элементарный объем в области горла, в котором происходит образование пузырьков критического размера. С другой стороны, поток массы пузырьков критического размера можно записать в виде

$$\dot{G}_{\text{пкр}} = \dot{n} \frac{\pi D_{\text{пкр}}^3}{6} \rho_{\text{п}}. \quad (6.113)$$

Приравнявая (6.112) и (6.113) найдем поток пузырей

$$\dot{n} = \dot{J}_{\text{кр}} F dl = \text{const}, \text{ 1/с.} \quad (6.114)$$

Концентрацию пузырьков n_v в элементарном текущем объеме выразим через поток пузырей

$$n_v = \frac{\dot{n} d\tau}{F dx} = \frac{\dot{n} dx}{w_{\text{п}} F dx} = \frac{\dot{n}}{w_{\text{п}} F}. \quad (6.115)$$

В результате образования пузырьков критического размера капельный поток отдаст теплоту, и его температура незначительно понизится, так как $G_{\text{пкр}} \ll G_{\text{ж}}$. Упрощая задачу, будем полагать, что критические ядра образуются только один раз. В этом случае вдоль канала выполняется условие $\dot{n} = \text{const}$ (см. ф-лу 6.114).

При решении задачи возможно два случая. В первом – задан закон изменения площади поперечного сечения $F(x)$ вдоль канала, а во втором – закон распределение статического давления $p(x)$. Рассмотрим второй случай.

Изменение статического давления в конфузурной части трубки Вентури запишем в виде

$$p(x)_{\text{конф}} = \frac{p_0}{\left[\left(\frac{p_0}{p_{\text{г}}} - 1 \right) \left(\frac{x}{l_{\text{конф}}} \right)^m + 1 \right]}, \quad (6.116)$$

$$\text{тогда } \frac{dp}{dx} = \frac{2 p_0 \left(\frac{p_0}{p_{\text{г}}} - 1 \right) x}{l^2 \left[\left(\frac{p_0}{p_{\text{г}}} - 1 \right) \left(\frac{x}{l_{\text{конф}}} \right)^m + 1 \right]^2}, \quad (6.117)$$

где p_0 – статическое давление на входе в канал, $p_{\text{г}}$ – давление в горле канала, $m = 2 \dots 6$ – показатель степени.

Для диффузорной части канала

$$p(x)_{\text{диф}} = \frac{p_{\text{ср}}}{\left[\left(\frac{p_{\text{ср}}}{p_{\text{г}}} - 1 \right) \left(1 - \frac{x}{l_{\text{диф}}} \right)^m + 1 \right]}, \quad (6.118)$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2p_{cp} \left(\frac{p_{cp}}{p_r} - 1 \right) \left(1 - \frac{x}{l_{диф}} \right)}{l_{диф} \left[\left(\frac{p_{cp}}{p_r} - 1 \right) \left(1 - \frac{x}{l_{диф}} \right)^m + 1 \right]^2}, \quad (6.119)$$

где p_{cp} – статическое давление на выходном срезе трубки.
Коэффициент диффузии определим по формуле

$$D = 0,216 \cdot 10^{-4} \left(\frac{T_{ж}}{T_0} \right)^{1,8} \left(\frac{p_0}{p_{ж}} \right), \quad (6.120)$$

где $p_0=101325$ Па, $T_0=273$ К.

Используя выражение $\dot{G}_n = \dot{n} \frac{\pi D_n^3}{6} \rho_n$, найдем

$$\frac{d\dot{G}_n}{dx} = 4\pi R_n^2 \rho_n \dot{n} \frac{dR_n}{dx}. \quad (6.121)$$

Так как $\dot{G}_0 = \dot{G}_n + \dot{G}_ж = const$, то

$$\frac{d\dot{G}_ж}{dx} = -\frac{d\dot{G}_n}{dx}. \quad (6.122)$$

Из уравнения движения для всего потока

$$d(\dot{G}_n w_n + \dot{G}_ж w_ж) = -F_k dp - \tau_w \pi D_k dx \quad (6.123)$$

с учетом (6.122) получим

$$\frac{dw_ж}{dx} = -\frac{1}{\dot{G}_ж} \left[\dot{G}_n \frac{dw_n}{dx} + (w_n - w_ж) \frac{d\dot{G}_n}{dx} + F \frac{dp}{dx} + \tau_w \pi D_k \right], \quad 1/c. \quad (6.124)$$

Уравнение движения пузырька с учетом присоединенной массы жидкости имеет вид

$$\rho_n V_n \frac{dw_n}{d\tau} = -V_n \frac{dp}{dx} + \frac{\pi D_n^2}{8} \rho_ж c_x |w_ж - w_n| (w_ж - w_n) - \frac{1}{2} \rho_ж V_n \left(\frac{dw_n}{d\tau} - \frac{dw_ж}{d\tau} \right). \quad (6.125)$$

Подставив (6.124) в (6.125), определим

$$\frac{dw_n}{dx} = \frac{1}{\rho_n V_n w_n \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\rho_ж}{\rho_n} \left(1 + \frac{\dot{G}_n}{\dot{G}_ж} \right) \right]} \left\{ - \left(V_n + F_k \frac{B}{\dot{G}_ж} \right) \frac{dp}{dx} - \frac{B}{\dot{G}_ж} (w_n - w_ж) \frac{d\dot{G}_n}{dx} + \frac{\pi D_n^2}{8} \rho_ж c_x |w_ж - w_n| (w_ж - w_n) - \tau_w \frac{B}{\dot{G}_ж} \pi D_k \right\} 1/c, \quad (6.126)$$

где $B = 0,5 \rho_ж V_n w_n$; $c_x = \frac{32}{Re_n} \left(1 - \frac{0,314}{\sqrt{Re_n}} \right)$; $Re_n = \frac{|w_ж - w_n| D_n}{\nu_ж}$.

Изменение концентрации газа и температуры жидкости вдоль канала определим из уравнений (6.127) и (6.128)

$$\frac{dC_{г\infty}}{dx} = - \frac{\left(\frac{j\pi D_{п}^2 n_v F_k}{\left(\frac{\pi D_k^2}{4} - f_{п} \right) w_{ж}} \right)}{\left(\frac{\pi D_k^2}{4} - f_{п} \right) w_{ж}^2} = - \frac{2\pi D_{п} \dot{n} D(C_{г\infty} - C_{п})}{\left(\frac{\pi D_k^2}{4} - f_{п} \right) w_{ж}^2}, \quad (6.127)$$

$$\frac{dt_{ж}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{ж} c_{пж}} \left[\alpha \pi D_{п}^2 n_v F_k (t_{ж} - t_{п}) + \tilde{r} \left(\frac{d\dot{G}_{п}}{dx} \right) \right]. \quad (6.128)$$

Изменение радиуса пузырька, движущегося в потоке жидкости со скоростью $w_{п}$, вдоль продольной координаты канала определим из уравнения

$$\frac{dR_{п}}{dx} = \frac{1}{w_{п} R_{п}} \left[\frac{D}{\rho_{г}} \left(C_{г\infty} - \frac{p_{г}}{R_{г} T_{гг}} \right) + \frac{\lambda_{ж}}{\tilde{r} \rho_{п}''} (t_{ж\infty} - t_s(p_{п})) \right]. \quad (6.129)$$

Однако уравнение в форме (6.129) не учитывает влияние сил инерции, поверхностных и вязкостных сил, которые присутствуют в уравнении Релея:

$$\frac{dU'_{п}}{d\tau} = \frac{1}{R_{п} \rho_{ж}} \left[(p_s - p_{ж}) - \left(\frac{3}{2} U_{п}'^2 \rho_{ж} + \frac{2\sigma}{R_{п}} + \frac{4\mu_{ж}}{R_{п}} U'_{п} \right) \right],$$

$$\frac{dR_{п}}{d\tau} = U'_{п}, \quad \text{где } U'_{п} \text{ - скорость поверхности пузырька.} \quad (6.130)$$

Используя (6.129) и (6.130) можно в общем случае написать:

$$\frac{dU_{п}}{dx} = \frac{(p_s - p_{ж})}{R_{п} \rho_{ж} w_{п}^2} - \frac{3}{2R_{п}} U_{п}^2 - \frac{2\sigma}{R_{п}^2 \rho_{ж} w_{п}^2} - \frac{4\mu_{ж}}{R_{п}^2 \rho_{ж} w_{п}} U_{п} - \frac{U_{п} dw_{п}}{w_{п} dx},$$

$$\frac{dR_{п}}{dx} = U_{п} + \frac{1}{w_{п} R_{п}} \left[\frac{D}{\rho_{г}} \left(C_{г\infty} - \frac{p_{г}}{R_{г} T_{гг}} \right) + \frac{\lambda_{ж}}{\tilde{r} \rho_{п}''} (t_{ж\infty} - t_s(p_{п})) \right]. \quad (6.131)$$

Численное решение рассмотренной задачи реализовано в программе “VENT_23” (см. приложение №5).

7. Воздействия на поток

7.1. Расчет инжектора, работающего на сухом насыщенном паре

В данном разделе “Одномерный двухфазный поток” рассматриваются процессы расширения, смешения и конденсации двухфазного потока в каналах переменного сечения с прямой осью. На основе полученных уравнений составлены программы расчета, позволяющие определить искомые физические величины вдоль канала. Однако большинство энергетических устройств состоят из нескольких сопряженных элементов. Так, например, инжектор включает сопло, камеру смешения и диффузор. В этом случае следует составлять программу для каждого элемента, а затем, после отладки, объединять их в единое целое. Такой подход особенно плодотворен, когда ре-

шаются прямые задачи, где при движении двухфазного потока возможны кризисные явления.

В качестве примера рассмотрим расчет инжектора, работающего на сухом насыщенном паре [32].

Инжектор - это струйный аппарат, который сочетает в себе компактный высокоэффективный теплообменный аппарат (камеру смешения), где в процессе конденсации пара на холодных каплях пассивной жидкости коэффициент теплоотдачи достигает сотен тысяч Вт/(м²К) (при конденсации пара на холодных стенках $\alpha=7000...9000$ Вт/(м²К)), и насос, позволяющий в несколько раз повысить давление на выходе по сравнению с давлением активного (пар) и пассивного (холодная жидкость) агентов на входе в инжектор.

Первый пароводяной инжектор, созданный Г. Джиффардом в 1858 году [33], использовался в качестве насоса для подачи воды в котел паровоза. В последующие годы интерес к исследованию этих струйных аппаратов снизился в связи с появлением насосов, имеющих более высокую эффективность.

В 60-е годы, в период бурного развития космонавтики, инжекторы использовались в компактных жидкометаллических МГД-преобразователях (аппаратах для непосредственного преобразования теплоты в электрическую энергию), предназначенных для космических объектов.

В настоящее время, по предложению проф. В.В.Фисенко, инжекторы начинают применяться в отопительных системах зданий, что позволяет экономить топливо (до 10...12%) и электроэнергию по сравнению с существующими схемами, включающими подогреватели сетевой воды и насосы.

В предлагаемой методике расчета инжектора вначале выполняется расчет "разгонного" сопла (сопла Лавалья), а затем камеры смешения и диффузора, состоящего из сопряженных цилиндрического и конического каналов.

Так как равновесная модель расширения пара с верхней пограничной кривой с учетом сил трения удовлетворительно согласуется с опытными данными, то используем ее для расчета сопла Лавалья. Будем считать, что статическое давление вдоль канала меняется по закону (обратная задача)

$$p = \frac{p_0}{\left(\frac{p_0}{p_{CP}} - 1\right) \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1}, \text{ где } x\text{-текущая координата, } l\text{-длина сопла, } p_0 \text{ и } p_{CP} -$$

статические давления на входе и на срезе сопла соответственно.

В этом случае система обыкновенных дифференциальных уравнений примет вид

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{2p_0(p_0/p_{CP} - 1)x}{l^2 \left[(p_0/p_{CP} - 1) \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1 \right]}, \quad \frac{dF}{dx} = -(M^2 - 1) \frac{vF}{w^2} \frac{dp}{dx},$$

$$\frac{dw_s}{dx} = -\frac{v}{w_s} \frac{dp}{dx}, \quad \frac{dw}{dx} = -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \quad \frac{dv}{dx} = \frac{v}{w} \frac{dw}{dx} + \frac{v}{F} \frac{dF}{dx},$$

$$\frac{dT}{dx} = (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx}, \text{ где}$$

w_s, w - изоэнтропийная и действительная скорости влажного пара,

$$c_f = f(\text{Re}); \quad \text{Re} = wD\rho/\mu; \quad \mu = \frac{\mu''\mu'}{x\mu' + (1-x)\mu''}; \quad M = w/a; \quad a = \frac{1}{c_v T} \left(\frac{vr}{v'' - v'} \right)^2;$$

$v = xv'' + (1-x)v'$; $c_v = xc_v'' + (1-x)c_v'$, удельные изохорные теплоемкости берутся со стороны двухфазной области [5]. Наличие сил трения приводит к появлению теплоты трения, которая увеличивает степень сухости пара (а следовательно, и его удельный объем):

$$x_d = x_s + (1 - \varphi_c^2) \frac{w_s^2}{2r},$$

где $\varphi_c = w/w_s$ - коэффициент скорости сопла, r - удельная теплота парообразования.

На срезе сопла поток равновесен, следовательно $T_{ГК} = T_{П} = T$, $w_{ГК} = w_{П} = w$, а секундные массы сухого насыщенного пара и капель соответственно равны: $\dot{G}'' = x_d \dot{G}_{CM}$, $\dot{G}' = (1 - x_d) \dot{G}_{CM}$. Задаваясь размером горячих капель ($D_K = (1...2) \cdot 10^{-5}$ мм) на выходном срезе сопла, образовавшихся в результате конденсации пара в процессе расширения, определим их поток и концентрацию

$$\dot{n} = 6\dot{G}' / \pi D_K^3 \rho' \text{ [с}^{-1}\text{]}, \quad n_v = \dot{n} / w_K F_C \text{ [м}^{-3}\text{]}.$$

Результаты расчета на срезе сопла передаются в качестве входных граничных условий для программы расчета камеры смешения через файл данных CJ4A.DAT (см. приложение №5, программа VAP7B_IN).

Рассмотрим процессы в камере смешения. Так как расчет “разгонного” сопла Лавалья осуществляется на основе равновесной модели с трением, то предполагается, что в камеру смешения (КС) поступает равновесный влажный пар, у которого $w_{ГК} = w_{П}$, $T_{ГК} = T_{П}$. Для осуществления процесса конденсации пара в камеру также подается холодная вода, как правило, при незначительной скорости. В результате силового взаимодействия между несущим паровым потоком и холодными каплями происходит их дробление, причем диаметр мелких холодных капель определяется по формуле [11]

$$\left(\frac{D_{ХК}}{D_{0ХК}} \right)^{0,25} = \frac{1,9}{We_0^{0,25}} + 0,135 \left(\frac{\rho_{0П}''}{\rho_{0ХК}} \right)^{1,5} c_{x0} We_0^{0,125} \ln \left(\frac{D_{0ХК}}{D_{ХК}} \right),$$

где $We_0 = \frac{\rho_{0П}'' (w_{П} - w_{ХК})^2 D_{0ХК}}{\sigma_{0ХК}}$ - критерий Вебера, определяемый по условиям на

входе в КС; $c_{x0} = f(\text{Re}_0)$; $\text{Re}_0 = \frac{\rho_{0П}'' (w_{П} - w_{ХК})_0 D_{0ХК}}{\mu_{0П}}$.

Сделаем допущение: разрушение капель происходит на участке, протяженность которого много меньше длины КС. Как отмечалось в §4.4,

будем считать, что в начальном сечении КС холодные и горячие капли равномерно распределены в паре, то в целом поток термически и механически неравновесен. Расчет будем вести на основе обратной задачи, полагая заданным закон изменения статического давления вдоль КС, при этом будем считать, что $\frac{dp}{dx} < 0$. Секундный расход холодной воды, подаваемой в начальном сечении КС,

в первом приближении определяется из уравнения теплового баланса $(i'(p_{KC0}) + r(p_{KC0})x_d - i'(p_{KC.CP}))\dot{G}_\Pi = \dot{G}_{XB}(i'(p_{KC.CP}) - i_{XB} - \Delta i_{HEД})$ где p_{KC0} и $p_{KC.CP}$ - статические давления парожидкостного потока соответственно на входе и выходе КС; \dot{G}_Π - расход пара через сопло Лавалья, который в дальнейшем уточняется; $\Delta i_{HEД}$ - недогрев холодной воды до температуры насыщения.

Для камеры с изобарным процессом $i'(p_{KC0}) = i'(p_{KC.CP})$ и уравнение теплового баланса примет вид:

$$r(p_{KC})x_d \dot{G}_\Pi = \dot{G}_{XB}(i'(p_{KC}) - i_{XB} - \Delta i_{HEД}).$$

Аналогичные формулы можно написать и для горячих (испаряющихся) капель.

Уравнения движения для горячих и холодных капель можно записать так:

$$\frac{dw_{ГК}}{dx} = -\frac{1}{\rho_{ГК} w_{ГК}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D_{ГК}^*}{\pi D_{ГК}^3 \rho_{ГК} w_{ГК}},$$

$$\frac{dw_{ХК}}{dx} = -\frac{1}{\rho_{ХК} w_{ХК}} \frac{dp}{dx} + \frac{6D_{ХК}^*}{\pi D_{ХК}^3 \rho_{ХК} w_{ХК}} + \frac{(w_\Pi - w_{ХК}) d\dot{G}_{ХК}}{\dot{G}_{ХК} dx},$$

где $\frac{dp}{dx} = -\frac{2p_{KC0}(p_{KC0}/p_{KC.CP} - 1)x}{l_{KC}^2 \left[(p_{KC0}/p_{KC.CP} - 1) \left(\frac{x}{l_{KC}} \right)^2 + 1 \right]}$; $D^* = c_x (Re) \pi D_K^2 \rho_\Pi (w_\Pi - w_K) |w_\Pi - w_K| / 8$;

$$Re = \frac{|w_\Pi - w_K| D_K \rho_\Pi}{\mu_\Pi}.$$

Дифференцируя левую часть уравнения движения для всего потока

$d(\dot{G}_{ГК} w_{ГК} + \dot{G}_{ХК} w_{ХК} + \dot{G}_\Pi w_\Pi) = -F_{CM} dp - \tau_w \pi D_{CM} dx$ и разрешая его относительно dw_Π/dx с учетом, что $d\dot{G}_{ХК} + d\dot{G}_{ГК} + d\dot{G}_\Pi = 0$, получим

$$\frac{dw_\Pi}{dx} = \left[-F_{CM} \frac{dp}{dx} - \tau_w \pi D_{CM} - \dot{G}_{ГК} \frac{dw_{ГК}}{dx} - \dot{G}_{ХК} \frac{dw_{ХК}}{dx} + (w_\Pi - w_{ГК}) \frac{d\dot{G}_{ГК}}{dx} + (w_\Pi - w_{ХК}) \frac{d\dot{G}_{ХК}}{dx} \right] / \dot{G}_\Pi.$$

Рассматривая процесс конденсации на холодной капле, можно написать

$$G_{ХК} di_{ХК} = r dG_{\Pi-K} - \alpha_{\Pi-K} \pi D_{ХК}^2 (T_\Pi - T_{ХК}) d\tau,$$

где $G_{ХК} = \frac{\pi D_{ХК}^3}{6} \rho_{ХК}$.

Для установившегося теплового состояния уравнение примет вид

$$r dG_{\Pi-K} = \alpha_{\Pi-K} \pi D_{ХК}^2 (T_\Pi - T_{ХК}) d\tau,$$

откуда находим скорость изменения диаметра холодной капли

$$\frac{dD_{ХК}}{d\tau} = \frac{2\alpha(T_\Pi - T_{ХК})}{r\rho_{ХК}},$$

где $\alpha_{\text{п-к}} = \left(2 + 0,6 \text{Re}_k^{0,5} \text{Pr}_\Pi^{0,33}\right) \frac{\lambda_\Pi}{D_{\text{ХК}}}$.

Расход холодных капель можно записать в виде

$$\dot{G}_{\text{ХК}} = \frac{\pi D_{\text{ХК}}^2}{6} \rho_{\text{ХК}} \dot{n}.$$

Дифференцируя последнее уравнение при $\dot{n} = \text{const}$, получим

$$d\dot{G}_{\text{ХК}} = \frac{\pi D_{\text{ХК}}^2}{2} \rho_{\text{ХК}} \dot{n} dD_{\text{ХК}} = \frac{3\dot{G}_{\text{ХК}}}{D_{\text{ХК}}} dD_{\text{ХК}} \text{ или } \frac{d\dot{G}_{\text{ХК}}}{dx} = \frac{3\dot{G}_{\text{ХК}}}{D_{\text{ХК}}} \frac{dD_{\text{ХК}}}{dx}.$$

Так как в КС движется однокомпонентный двухфазный поток, то $T_\Pi = f(p)$. Изменение температуры холодных капель вдоль продольной координаты найдем после численного интегрирования уравнения

$$\frac{di_{\text{ХК}}}{dx} = \left[(i_\Pi^* - i_{\text{ХК}}^*) j_{\text{п-хк}} + \alpha_{\text{п-хк}} (T_\Pi - T_{\text{ХК}}) \right] \frac{6}{w_{\text{ХК}} \rho_{\text{ХК}} D_{\text{ХК}}} - w_{\text{ХК}} \frac{dw_{\text{ХК}}}{dx},$$

$$T_{\text{ХК}} = \varphi(i_{\text{ХК}}).$$

Температуру горячих капель определим из уравнения энергии, записанного для всего потока

$$\dot{G}_{\text{ГК}} i_{\text{ГК}}^* + \dot{G}_{\text{ХК}} i_{\text{ХК}}^* + \dot{G}_\Pi i_\Pi^* = \dot{I}_{\text{СМ0}},$$

где $i_{\text{СМ0}}^*$ - полная энтальпия парожидкостного потока на входе в КС по заторможенным параметрам

$$i_{\text{ГК}} = \left(\dot{I}_{\text{СМ0}}^* - \dot{G}_\Pi i_\Pi^* - \dot{G}_{\text{ХК}} i_{\text{ХК}}^* \right) / \dot{G}_{\text{ГК}} - \frac{w_{\text{ГК}}^2}{2}, \quad T_{\text{ГК}} = f(i_{\text{ГК}}).$$

Предполагается, что после достижения граничной плотности поток имеет пузырьковую структуру, а фазы находятся в механическом равновесии. Исходя из этих условий, на основе термически неравновесной модели выполняется

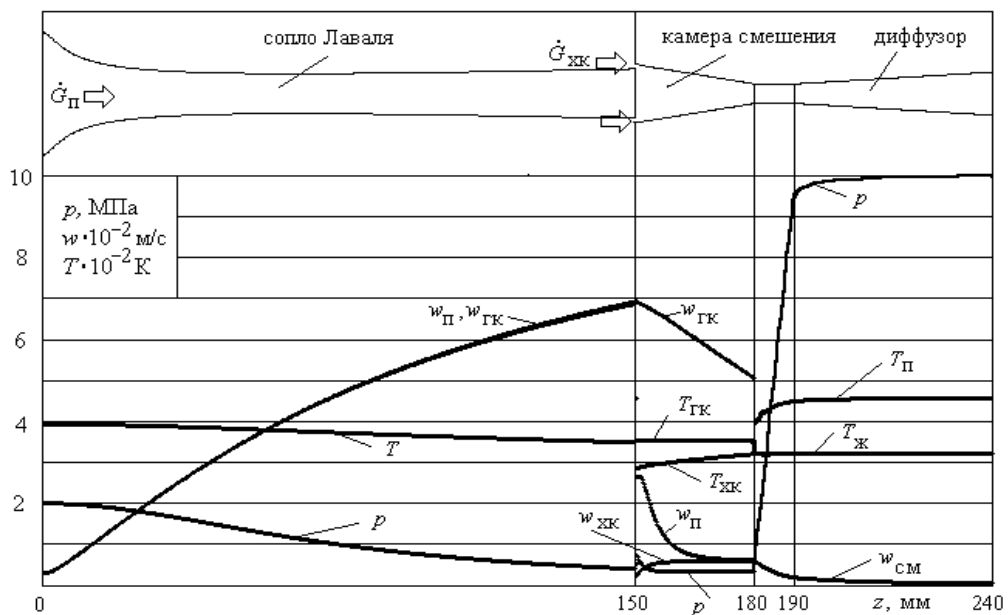


Рис. 7.1

расчет диффузора, состоящего из сопряженных цилиндрического и конического

каналов. Считается, что скачок конденсации расположен в цилиндрической части, в котором происходит конденсация основной массы пара.

Ниже приводятся дифференциальные уравнения, на основе которых выполнялся расчет диффузора с заданными геометрическими размерами.

$$\frac{dI}{dz} = p \frac{dF_d}{dz} - \tau_w \pi D_d,$$

$$\frac{dD_n}{dz} = 8\lambda_{ж} c_{pж} \rho_{ж} |T_{ж} - T_s| (T_{ж} - T_s) \chi_k / ((r\rho_n)^2 D_n w),$$

или, если стоять на позициях Герца-Кнудсена, $\frac{dD_n}{dz} = -\frac{2\Delta j_{n-ж}}{\rho_n w}$, где $F_d = f(z)$;

$I = \dot{G}w + pF_d$ - полный импульс потока; τ_w - касательное напряжение на стенке канала; χ_k - коэффициент, учитывающий реальность процесса конденсации.

Определив величину полного импульса на координате z , находим текущее значение статического давления $p = (I - \dot{G}_{см}w) / F_d$.

На рис.7.1 показано изменение основных физических величин вдоль продольной оси инжектора, полученных в результате численного решения систем уравнений. Из рисунка видно, что давление горячей воды на выходе из инжектора в пять раз превышает давление сухого насыщенного пара на входе в сопло. Наши опыты показали (см. рис.7.2), что максимальное превышение давления около 3,6. Такое расхождение можно объяснить упрощенной моделью процесса, в которой не учитывались мощность трения, дробление и коагуляция капель, полидисперсность капельного потока, наличие жидкой пленки и срывные явления. Однако расчеты, выполненные на основе предложенных систем уравнения с учетом уравнений сохранения в интегральной форме, позволяют определить геометрию и размеры проточной части инжектора с

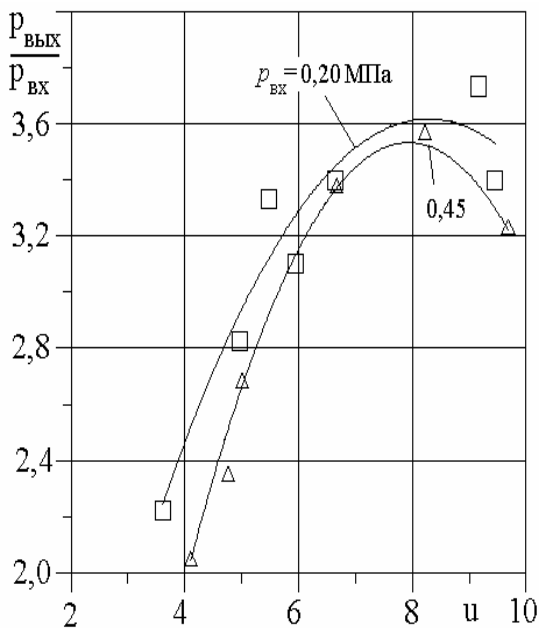


Рис. 7.2

удовлетворительной точностью. При создании инжекторов с большой производительностью ($\dot{G}_n \geq 1$ кг/с) расчет камеры смешения следует выполнять на основе двумерных моделей.

Расчет смесительного устройства, состоящего из сопла Лавалья и камеры смешения, реализуется в программе Accel_1 (см. приложение №6).

7.2 Кризис течения в спутных и двухфазных потоках

Сечение канала, где скорость газового потока достигает местной термодинамической скорости звука, называется критическим. В критическом сечении имеют место и критические параметры. Получим эти параметры.

Из первого закона термодинамики для потока

$$d\dot{Q} = d\dot{i}^* + d\dot{L}_{\text{tex}} + g\dot{G}dH$$

получим уравнение энергии для адиабатического канала

$$d\dot{i}^* = 0.$$

Считая процесс изоэнтропийным, а истечение идеального газа происходит из бесконечно большого объема, то из

$$w dw = - di,$$

где $di = c_p dT$, с учетом $pv^k = \text{const}$ определим скорость потока

$$w = \sqrt{\frac{2kp_0^*v_0^* \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}{k-1}}, \quad (7.2.1)$$

где $\beta = \frac{p}{p_0^*}$. Из $i^* = i + \frac{w^2}{2}$ найдем $T_0^* = T \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)$. Так как при кризисе течения

$M = \frac{w}{a} = \frac{w}{\sqrt{kRT}} = 1$, то $T_{\text{кр}} = \frac{2}{k+1} T_0^*$. Используя связь между параметрами

$\frac{T_{\text{кр}}}{T_0^*} = \left(\frac{p_{\text{кр}}}{p_0^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}$, определим $\beta_{\text{кр}} = \frac{p_{\text{кр}}}{p_0^*} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$. Подставляя $\beta_{\text{кр}}$ в (1), получим

выражение критической скорости потока

$$w_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2kp_0^*v_0^*}{k+1}} = \sqrt{\frac{2kRT_0^*}{k+1}}. \quad (7.2.2)$$

Так как $\frac{T_{\text{кр}}}{T_0^*} = \left(\frac{\rho_{\text{кр}}}{\rho_0^*}\right)^{k-1}$, то $\rho_{\text{кр}} = \rho_0^* \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$. Максимальную плотность тока найдем из формулы

$$(\rho w)_{\text{кр}} = \sqrt{\rho_0^* v_0^* \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (7.2.3)$$

Можно также показать, что ‘запирание’ потока происходит в том сечении канала, где выполняется условие $\left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)_s = 0$. Подставляя в уравнение

сплошности $f = \frac{\dot{G}}{w\rho}$, $\rho = \frac{\beta^{\frac{1}{k}}}{v_0^*}$ и w из (1), получим $f = \frac{\dot{G}}{\sqrt{\frac{2kp_0^* \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right)}{(k-1)v_0^*}}}$. (7.2.4)

Производная от (7.2.4) по β имеет вид:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \beta}\right)_s = - \frac{\dot{G} \left(2\beta^{\frac{2-k}{k}} - (k+1)\beta^{\frac{1}{k}} \right)}{2k \sqrt{\frac{2kp_0^*}{(k-1)v_0^*}} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (7.2.5)$$

Приравнявая $\left(\frac{\partial f}{\partial p}\right)_s = 0$ получим $\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$, что и требовалось доказать.

Рассмотрим два спутных потока, движущихся в адиабатном канале. Будем считать, что один поток сжимаемый, а другой нет. В любом поперечном сечении потока выполняется условие $p_ж = p_г = p$. Тогда условие кризиса запишется в виде

$$\left(\frac{\partial f_ж}{\partial p}\right)_s + \left(\frac{\partial f_г}{\partial p}\right)_s = 0 \text{ или } \left(\frac{\partial f_ж}{\partial p}\right)_s = - \left(\frac{\partial f_г}{\partial p}\right)_s. \quad (7.2.6)$$

Из $w dw = -\frac{dp}{\rho} + dl_{тр}$ для несжимаемого изоэнтروпийного потока после интегрирования получим $w_ж = \sqrt{\frac{2(p_0^* - p)}{\rho_ж}} = \sqrt{\frac{2p_0^*(1-\beta)}{\rho_ж}}$. Далее можно

написать $f_ж = \frac{\dot{G}_ж}{w_ж \rho_ж} = \frac{\dot{G}_ж}{\sqrt{\frac{2p_0^*(1-\beta)}{\rho_ж}} \cdot \rho_ж}$,

откуда
$$\left(\frac{\partial f_ж}{\partial p}\right)_s = \frac{\dot{G}_ж}{2 \left(\frac{2p_0^*}{v_ж}\right)^{\frac{1}{2}} (1-\beta)^{\frac{3}{2}}}. \quad (7.2.7)$$

Подставляя (7.2.7) и (7.2.5) в (7.2.6), определим соотношение между расходами при критическом режиме истечения в зависимости от $\beta_{кр}$

$$\left(\frac{\dot{G}_ж}{\dot{G}_г}\right)_{кр} = \frac{\left(2\beta^{\frac{2-k}{k}} - (k+1)\beta^{\frac{1}{k}} \right)_{кр} \left(\frac{2p_0^*}{v_ж} \right)^{\frac{1}{2}} (1-\beta_{кр})^{\frac{3}{2}}}{k \left(\frac{2kp_0^*}{(k-1)v_{г0}^*} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)_{кр}^{\frac{3}{2}}} = \left(2\beta^{\frac{2-k}{k}} - (k+1)\beta^{\frac{1}{k}} \right)_{кр} \left(\frac{(k-1)v_{г0}^*}{k^3 v_ж} \left(\frac{1-\beta}{\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}} \right)_{кр}^3 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.2.8)$$

На рис. 7.3 показан ход кривых $\beta_{кр} = f\left(\frac{\dot{G}_ж}{\dot{G}_г}\right)_{кр} = f(G_{от})$ для случаев, когда сжимаемые потоки имеют показатель изоэнтропы $k=1,4$ (воздух) и $k=1,135$ (сухой насыщенный водяной пар).

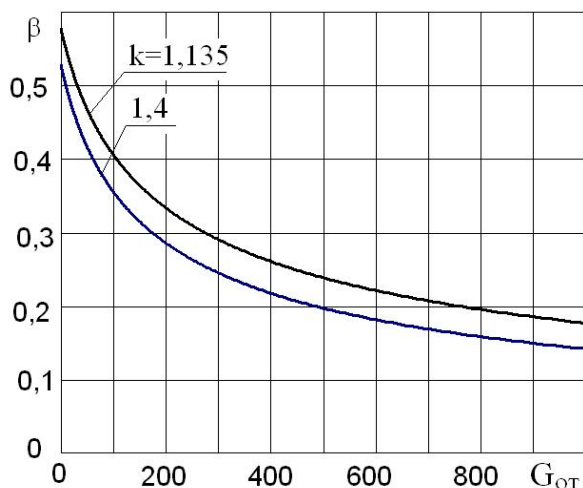


Рис. 7.3

Из рисунка видим, что с ростом относительного расхода жидкости в потоке $\beta_{кр}$ падает, при этом минимальное сечение струи газа, где $M_r = 1$, смещается относительно “горла” вверх по потоку. При $G_{от} \rightarrow 0$ $\beta_{кр} \rightarrow \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$; если $G_{от} \rightarrow \infty$, то $\beta_{кр} \rightarrow 0$. В минимальном сечении сопла Лавая, когда $G_{от} > 0$, число Маха M_r также больше единицы и определяется из выражения

$$M_r^2 = \left(\frac{w_r}{a_r}\right)^2 = \frac{2}{k-1} \left(\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} - 1\right), \quad \text{где } a_r^2 = \frac{kp}{\rho}.$$

Уравнение (7.2.8) реализовано в программе “Beta” (см. приложение №5).

Условию (7.2.8) отвечает равенство нулю главного определителя системы уравнений, описывающих движение двух спутных потоков (см., например, выражение (4.20)):

$$\left(M_r^2 - \frac{\dot{G}_ж}{\dot{G}_r} \left(\frac{w_r}{w_ж}\right)^3 \left(\frac{\rho_r}{\rho_ж}\right)^2 - 1\right) = 0. \quad (7.2.9)$$

Условие (7.2.9) справедливо и для случая двухфазного паро-капельного или газо-капельного потока (см., например, параграф 4.2, ф-ла (4.40)).

Для двух спутных сжимаемых потоков будем иметь:

$$\frac{\dot{G}_2 w_2}{\dot{G}_1 w_1} \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 (M_1^2 - 1) + (M_2^2 - 1) = \frac{\dot{G}_1}{w_1^3 \rho_1^2} (M_1^2 - 1) + \frac{\dot{G}_2}{w_2^3 \rho_2^2} (M_2^2 - 1) = 0. \quad (7.2.10)$$

Изменение статического давления вдоль канала можно найти из уравнения

$$\frac{dp}{dx} = \frac{w_2 \left[\left(\frac{\rho_2 w_2}{\rho_1 w_1} - \frac{1}{w_2} \right) \tau_{1-2} \pi D_1 + \tau_w \frac{\pi D \dot{e}}{w_2} - \rho_2 w_2 \frac{dF_c}{dx} \right]}{\left(u \frac{w_2}{w_1} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 (M_1^2 - 1) + M_2^2 - 1 \right) f_2}, \quad (7.2.11)$$

где $u = \frac{\dot{G}_2}{\dot{G}_1}$; τ_{1-2} – касательное напряжение на границе раздела потоков (здесь поток с индексом 1 и диаметром D_1 – центральный); τ_w – касательное напряжение на стенке; F_c – площадь поперечного сечения канала; f – площадь поперечного сечения i -го потока; D_k – диаметр канала.

Выражение (10) получено для двух спутных потоков. Для n потоков будем иметь

$$\sum_{i=1}^n \frac{\dot{G}_i}{w_i^3 \rho_i^2} (M_i^2 - 1) = 0, \quad (7.2.12)$$

то есть запаривание потока с разными физическими свойствами по поперечному сечению канала при уменьшении противодавления будет происходить постепенно, что подтверждается и нашими опытными данными (см. раздел IV).

При движении, например, в камере смешения двухфазного потока, содержащего пар, горячие и холодные капли, условие кризиса будет иметь вид:

$$\frac{w_{\Pi}^2}{(dp/d\rho_{\Pi}^{\prime\prime})} - \frac{\dot{G}_{ГК}}{\dot{G}_{\Pi}} \left(\frac{w_{\Pi}}{w_{ГК}} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Pi}^{\prime\prime}}{\rho_{ГК}^{\prime\prime}} \right)^2 - \frac{\dot{G}_{ХК}}{\dot{G}_{\Pi}} \left(\frac{w_{\Pi}}{w_{ХК}} \right)^3 \left(\frac{\rho_{\Pi}^{\prime\prime}}{\rho_{ХК}^{\prime\prime}} \right)^2 - 1 = 0. \quad (7.2.13)$$

Рассмотрим гомогенный парожидкостной поток. Так как кризис течения характеризуется независимостью плотности тока от давления, то можно написать

$$\left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial p} \right]_s = 0. \quad (7.2.14)$$

Раскрывая (7.2.14) с учетом уравнения Бернулли $w dw = -\frac{dp}{\rho}$ при $ds = 0$, получим

$$\left[\frac{\partial(\rho w)}{\partial p} \right]_s = \frac{M^2 - 1}{w} = 0. \quad (7.2.15)$$

Таким образом, в гомогенном изоэнтропийном потоке, как и в потоке идеального газа, кризис течения имеет место при $M=1$. Здесь также для получения сверхзвуковых потоков необходимо применять каналы, имеющие суживающуюся и расширяющуюся части

$$(M^2 - 1) \frac{dw}{w} = \frac{dF}{F}. \quad (7.2.16)$$

Кризис течения имеет место в наименьшем сечении канала, то есть при $dF=0$, в этом сечении поток имеет наибольшую плотность тока $\rho w = (\rho w)_{\max}$ (см. программы ROCM и ROCSF, приложение 5). В реальном потоке действие сил трения смещает критическое сечение в расширяющуюся часть сопла Лавалья.

7.3. Парогенерирующие каналы

Во многих энергетических системах в качестве рабочего тела используются газы или пары. Так, в цикле Ренкина турбина работает, как правило, на перегретом водяном паре, который производится из воды в

парогенераторе. Превращение воды в пар сопровождается сложнейшими физическими процессами. При движении воды в обогреваемом канале она вначале нагревается до температуры насыщения, затем появляются паровые пузырьки, которые растут и лопаются, образуя капельно-паровую структуру с текущей пленкой по стенке трубы (дисперсно-кольцевое течение). На определенном расстоянии пленка испаряется и реализуется дисперсный режим течения и, наконец, испаряются и капли, а поток становится однофазным. В начале образования дисперсно-кольцевого режима на поверхности пленки имеются волны, имеет место срыв капель с поверхности гребней и выпадение капель из ядра потока. Поэтому существующие теоретические модели процесса удовлетворительно отражают реальные явления лишь при определенных режимных параметрах. В нашем случае мы рассмотрим возможные модели процессов, решая уравнения численным методом. Сделано предположение, что при значительных температурных напорах между греющим и нагреваемым потоками реализуется гомогенное, а при малых - расслоенное течение, что может иметь место в криогенных теплообменных аппаратах.

Гомогенная модель.

Для гомогенной модели уравнения движения и энергии записываются в виде:

$$\begin{aligned} \dot{G}dw &= -Fdp - \tau_w \pi D dx, \\ \dot{G}di^* &= q_w \pi D dx, \quad \text{где } i = f(v, p). \end{aligned}$$

После преобразования этих уравнений будем иметь:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \\ \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dv}{dx} + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v \frac{dp}{dx} + w \frac{dw}{dx} &= \frac{4q_w v}{wD}. \end{aligned}$$

Запись уравнения энергии в таком виде позволяет рассматривать двухкомпонентные потоки, когда $i = f(p, v)$.

Теперь вместе с уравнениями сплошности и Клапейрона-Клаузиуса система уравнений примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dx} &= -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \\ \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dv}{dx} + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v \frac{dp}{dx} + w \frac{dw}{dx} &= \frac{4q_w v}{wD}, \\ \frac{dv}{dx} &= \frac{v}{w} \frac{dw}{dx} - \frac{v}{F} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dT}{dx} &= (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx}. \end{aligned}$$

Разрешая систему относительно dp/dx , получим

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= \frac{1}{\left[\left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v - \frac{v^2}{w^2} \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p - v \right]} \left[\frac{4q_w v}{wD} + \frac{2c_f}{D} \left(v \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p + w^2 \right) - \frac{v}{F} \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p \frac{dF}{dx} \right] \\ \frac{dw}{dx} &= -\frac{v}{w} \frac{dp}{dx} - \frac{2c_f w}{D}, \\ \frac{dv}{dx} &= \frac{v}{w} \frac{dw}{dx} + \frac{v}{F} \frac{dF}{dx}, \\ \frac{dT}{dx} &= (v'' - v') \frac{T}{r} \frac{dp}{dx}, \end{aligned} \right.$$

где $c_f = f(\text{Re})$; $\text{Re} = wD\rho/\mu$; $\mu = \frac{\mu''\mu'}{x_v\mu' + (1-x_v)\mu''}$;

$\rho = \frac{1}{v}$; $v = (1-x_v)v' + x_v v''$; - удельный объем влажного пара; x_v - степень сухости пара.

Выразим частные производные $\left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p$ через термодинамические параметры. Запишем объединенный закон термодинамики для обратимого процесса в виде $Tds = di - vdp$ и возьмем частную производную по удельному объему при $p = \text{const}$: $T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_p = \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p$. Используя уравнения Максвелла

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial v}{\partial s} \right)_p, \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s = - \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v \quad \text{найдем, что} \quad \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p = T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_s = T \frac{dp}{dT} = \frac{r}{v'' - v'}.$$

Дифференцируя уравнение $Tds = di - vdp$ по давлению при $v = \text{const}$, получим

$$T \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v - v, \quad \text{но} \quad \left(\frac{\partial s}{\partial p} \right)_v = - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s, \quad \text{откуда} \quad \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s + v. \quad \text{Из уравнения}$$

$$Tds = c_v dT + T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv \quad \text{при} \quad s = \text{const}, \quad \text{будем иметь} \quad \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_s = - \frac{c_v}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v, \quad \text{с учетом чего}$$

$$\text{можно написать} \quad \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v = c_v \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_v + v = c_v \frac{dT}{dp} + v = \frac{c_v T}{r} (v'' - v') + v.$$

Подставляя в dp/dx выражения частных производных $\left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_v, \left(\frac{\partial i}{\partial v} \right)_p$ для однокомпонентного двухфазного потока получим:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\frac{4q_w v}{wD} + \frac{rv}{(v'' - v')} \left[\frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{vr} (v'' - v') \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right]}{\frac{rv^2}{(v'' - v')w^2} \left[\frac{c_v T (v'' - v')^2}{(vr)^2} - 1 \right]}.$$

Используя формулу для термодинамической скорости звука $a_s^2 = \frac{1}{c_v T} \left(\frac{rv}{v'' - v'} \right)^2$,

где $c_v = (1 - x_v)c_v' + x_v c_v''$ - удельная изохорная теплоемкость влажного пара;

c_v' и c_v'' - удельные теплоемкости насыщенной жидкости и сухого насыщенного пара со стороны двухфазной области [5], перепишем уравнение для $\frac{dp}{dx}$ в виде

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\frac{4q_w v}{wD} + a_s \sqrt{c_v T} \left[\frac{2c_f}{D} \left(1 + \frac{w^2}{a_s \sqrt{c_v T}} \right) - \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} \right]}{\frac{va_s \sqrt{c_v T}}{w^2} (M^2 - 1)},$$

где $M_1 = \frac{w}{a_s}$.

Рассматривая задачу при граничных условиях третьего рода, будем считать, что со стороны греющего пара канал имеет систему ребер (см. рис.7.4).

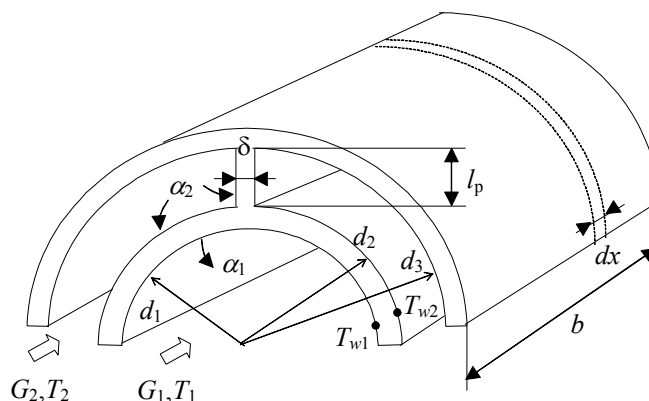


рис.7.4

Для одиночного ребра длиной b с изолированным торцом тепловой поток запишется в виде

$$\dot{Q}_p = 2\alpha_2 l_p b E (T_2 - T_{w2}), \text{ где } E = \frac{\text{th} \left(\frac{l_p}{\delta} \sqrt{\frac{2\alpha_2 \delta}{\lambda}} \right)}{\frac{l_p}{\delta} \sqrt{\frac{2\alpha_2 \delta}{\lambda}}} - \text{коэффициент эффективности ребра.}$$

Для элемента оребренной поверхности можно написать

$$d\dot{Q}_{pc} = [2l_p E n + (\pi d_2 - \delta n)] \alpha_2 (T_2 - T_{w2}) dx,$$

где n - число ребер.

Приравнявая тепловые потоки: $d\dot{Q}_{p.c.} = [2l_p E n + (\pi d_2 - \delta n)] \alpha_2 (T_2 - T_{w2}) dx$,

$$d\dot{Q}_{pc} = \frac{2\lambda (T_{w2} - T_{w1})}{d_1 \ln \left(\frac{d_2}{d_1} \right)} \pi d_1 dx \quad \text{и} \quad d\dot{Q}_{pc} = \alpha_1 \pi d_1 (T_{w1} - T_1) dx,$$

проходящие через канал в радиальном направлении, получим

$$d\dot{Q}_{pc} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_{ll}} dx,$$

где $R_{ll} = \frac{1}{[2l_p En + (\pi d_2 - \delta n)]\alpha_2} + \frac{1}{2\lambda\pi} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{\alpha_1\pi d_1}$ - суммарное линейное термическое сопротивление.

Плотность теплового потока на единицу поверхности выразим из уравнения

$$d\dot{Q}_{pc} = q_w \pi d_1 dx : \\ q_w = \frac{(T_2 - T_1)}{\pi d_1 R_{ll}}.$$

Система уравнений для греющего потока имеет вид:

$$\frac{dT_2}{dx} = -\frac{(T_2 - T_1)}{\dot{G}_2 R_{ll} c_{p2}}, \\ \frac{dp_2}{dx} = \frac{kM_2^2 p_2}{(M_2^2 - 1)} \left[\frac{c_{f2}}{(d_2 + d_3)} (1 + (k-1)M_2^2) - \frac{1}{F_2} \frac{dF_2}{dx} \right], \\ \frac{dw_2}{dx} = -\frac{1}{\rho_2 w_2} \frac{dp_2}{dx} - \frac{c_{f2} w_2}{(d_2 + d_3)},$$

где $F_2 = \frac{\pi}{4}(d_3^2 - d_2^2) - 2l_p \delta n$. Если в формулах число ребер положить равным нулю, то получим элементарный теплообменник типа "труба в трубе".

При решении задачи физические свойства потоков определялись как функции от температуры и давления, а c_f и α - в зависимости от числа Re из критериальных уравнений: $\xi = 64/Re$, $Nu = 0,15 Re^{0,32} Pr^{0,33}$ при $Re \leq 2300$ и $\xi = 0,184/Re^{0,2}$, $Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43}$, при $Re > 2300$; $c_f = \xi/4$,

$$\lambda_1 = \frac{\lambda'' \lambda'}{x_v \lambda' + (1 - x_v) \lambda''}.$$

Двухслойная модель.

Рассматривается испарение потока жидкости в горизонтальном обогреваемом канале с продольными ребрами на стороне греющего теплоносителя. Считалось, что в канал входит жидкость, недогретая до температуры насыщения. На некотором расстоянии от входа она становится

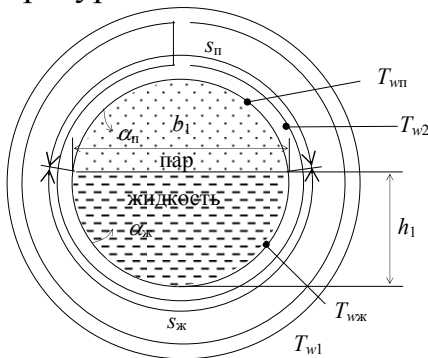


Рис.7.5

насыщенной, а с появлением паровой фазы возникает расслоенное в поле силы тяжести двухфазное течение. После испарения жидкости сухой насыщенный пар перегревается до заданной температуры. Остановимся на рассмотрении двухфазного расслоенного потока, так как запись уравнений сохранения для однофазных состояний вещества не представляет трудностей. Элементарный тепловой поток

от греющего агента можно представить в виде суммы потоков, получаемых жидкостью и паром:

$$d\dot{Q}_{pc} = d\dot{Q}_{ж} + d\dot{Q}_{п},$$

$$\text{где } d\dot{Q}_{ж} = [2l_p E n_{ж} + (s_{ж} - \delta n_{ж})] \alpha_2 (T_2 - T_{w2}) dx,$$

$$d\dot{Q}_{п} = [2l_p E n_{п} + (s_{п} - \delta n_{п})] \alpha_2 (T_2 - T_{w2}) dx. \quad \text{Здесь } n_{ж} = \frac{n s_{ж}}{\pi d_1}, \quad n_{п} = \frac{n s_{п}}{\pi d_1} - \text{число}$$

ребер, участвующих в передаче теплового потока к жидкости и пару, смысл $s_{ж}$ и $s_{п}$ понятен из рисунка, остальные обозначения – такие, как на рис.7.4. Приравнивая тепловые потоки, проходящие через канал в радиальном направлении, после ряда преобразований получим:

$$d\dot{Q}_{pc} = \left\{ \frac{1}{\frac{1}{[2l_p E n_{ж} + (s_{ж} - \delta n_{ж})] \alpha_2} + \frac{d_2}{2\lambda s_{ж}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{ж} s_{ж}}} + \frac{1}{\frac{1}{[2l_p E n_{п} + (s_{п} - \delta n_{п})] \alpha_2} + \frac{d_2}{2\lambda s_{п}} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_{п} s_{п}}} \right\} (t_2 - t_s(p)) dx.$$

Изменение температуры греющего потока вдоль продольной координаты определяется уравнением

$$\frac{dT_2}{dx} = \frac{1}{c_{p2} \dot{G}_2} \frac{d\dot{Q}_{pc}}{dx}.$$

Уменьшение высоты жидкости можно определить, полагая, что подводимая к двухфазному потоку теплота расходуется на испарение жидкости:

$$\frac{dh_1}{dx} = \frac{1}{r \rho_{ж} c_{ж} b_1} \frac{d\dot{Q}_{pc}}{dx},$$

где r – удельная теплота парообразования.

Зная текущую высоту уровня жидкости h_1 , можно определить величину хорды и дуги по формулам:

$$b_1 = 2(d_1 h - h^2)^{0.5}, \text{ где если } h_1 > d_1/2, \text{ то } h = d_1 - h_1, \text{ при } h_1 < d_1/2 \quad h = h_1;$$

$$s_{ж} = \pi d_1 (1 - \beta/360), \text{ где } \beta = \beta_R 360/2\pi; \quad \beta_R = 2 \arcsin(b_1/d_1), \text{ при } h_1 < d_1/2$$

$$s_{ж} = \pi d_1 \beta/360; \quad f_{п} = ((\pi d_1 - s_{ж})d_1/2 - b_1(d_1/2 - h))/2, \quad f_{ж} = \pi d_1^2/4 - f_{п}.$$

Считая поток безинерционным и механически равновесным (скольжение между фазами отсутствует), градиент статического давления найдем из уравнения

$$\frac{dp}{dx} = - \frac{4[\tau_{\text{вп}}(\pi d_1 - s_{\text{ж}}) + \tau_{\text{вж}} s_{\text{ж}}]}{\pi d_1^2}. \quad (*)$$

Степень сухости парожидкостного потока определим по уравнению

$$\frac{dx_v}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\text{см}} r} \frac{d\dot{Q}_{\text{pc}}}{dx}.$$

Скорость жидкости находится из уравнения сплошности

$$c_{\text{ж}} = \frac{(1-x_v)\dot{G}_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}} f_{\text{ж}}}.$$

Уравнения для грейющего потока записываются так же, как в гомогенной модели.

Предложенная физическая модель позволяет использовать традиционные критериальные уравнения теплоотдачи и трения, полученные для однофазных сред, и отказаться от уравнений вида [57]

$$\alpha_{\text{тр}} = \alpha_{\text{ж}} F_p \left[1 + C \left(\left(\frac{x}{1-x} \right)^m \left(\frac{1-F_p}{F_p} \right) \left(\frac{\text{Pr}_{\text{г}}}{\text{Pr}_{\text{ж}}} \right)^p \left(\frac{\mu_{\text{г}}}{\mu_{\text{ж}}} \right)^q \right) \right],$$

которые справедливы лишь при определенных режимных параметрах.

При выводе уравнений считалось, что раздел между фазами плоский, однако с уменьшением диаметра канала из-за действия капиллярных сил площадь стенки, смоченная жидкостью, будет возрастать, что положительно скажется на теплообмене. Рост скорости пара усилит этот эффект. Таким образом, можно предположить, что рассматриваемая модель позволит определить максимальную длину парогенерирующего канала.

Если учитывать скольжение между фазами, то система уравнений примет вид:

$$\frac{dw_{\text{п}}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\text{п}}} \left[-f_{\text{п}} \frac{dp}{dx} - \tau_{\text{вп}} s_{\text{п}} - \tau_{\text{пж}} b_1 - (w_{\text{п}} - w_{\text{ж}}) \frac{d\dot{G}_{\text{ж-п}}}{dx} \right],$$

где $\frac{d\dot{G}_{\text{ж-п}}}{dx} = \frac{1}{r} \frac{d\dot{Q}_{\text{pc}}}{dx}$,

$$\frac{dw_{\text{ж}}}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_{\text{ж}}} \left[-f_{\text{ж}} \frac{dp}{dx} - \tau_{\text{вж}} s_{\text{ж}} + \tau_{\text{пж}} b_1 \right],$$

$$w_{\text{ж}} \frac{df_{\text{ж}}}{dx} + f_{\text{ж}} \frac{dw_{\text{ж}}}{dx} = - \frac{1}{\rho_{\text{ж}}} \frac{d\dot{G}_{\text{ж-п}}}{dx},$$

$$f_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \frac{dw_{\text{ж}}}{dx} + \rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}} \frac{df_{\text{ж}}}{dx} + f_{\text{п}} \rho_{\text{п}} \frac{dw_{\text{п}}}{dx} + f_{\text{п}} w_{\text{п}} \frac{d\rho_{\text{п}}}{dp} \frac{dp}{dx} + \rho_{\text{п}} w_{\text{п}} \frac{df_{\text{п}}}{dx} = 0.$$

Разрешая ее относительно dp/dx , получим

$$\frac{dp}{dx} = \frac{w_n}{\left[\frac{w_n^2}{(dp_n/dp)} - \frac{\dot{G}_ж}{\dot{G}_n} \left(\frac{w_n}{w_ж} \right)^3 \left(\frac{\rho_n}{\rho_ж} \right)^2 - 1 \right] f_n} \times$$

$$\times \left[\frac{\rho_n w_n}{\rho_ж w_ж^2} \tau_{w_ж} s_ж + \frac{\tau_{w_n} s_n}{w_n} - \left(\frac{\rho_n w_n}{\rho_ж w_ж^2} - \frac{1}{w_n} \right) \tau_{nж} b_1 - \left(\frac{\rho_n w_n}{\rho_ж w_ж} - \frac{w_ж}{w_n} \right) \frac{d\dot{G}_{ж-н}}{dx} \right]$$

Зная dp/dx , найдем: dw_n/dx , $dw_ж/dx$, $\frac{df_n}{dx} = \frac{f_ж}{w_ж} \frac{dw_ж}{dx} + \frac{1}{\rho_ж w_ж} \frac{d\dot{G}_{ж-н}}{dx}$, $f_ж = F - f_n$.

Далее определим $b_1 = 2((d_1 - h_1)h_1)^{0,5}$, $s_n = \frac{4f_n}{d_1} + \frac{2b_1 h_1}{d_1} - b_1$ и $s_ж = \pi d_1 - s_n$.

Результаты расчета парогенерирующего канала представлены на рис.7.6. Система уравнений была реализована в среде Visual Basic.

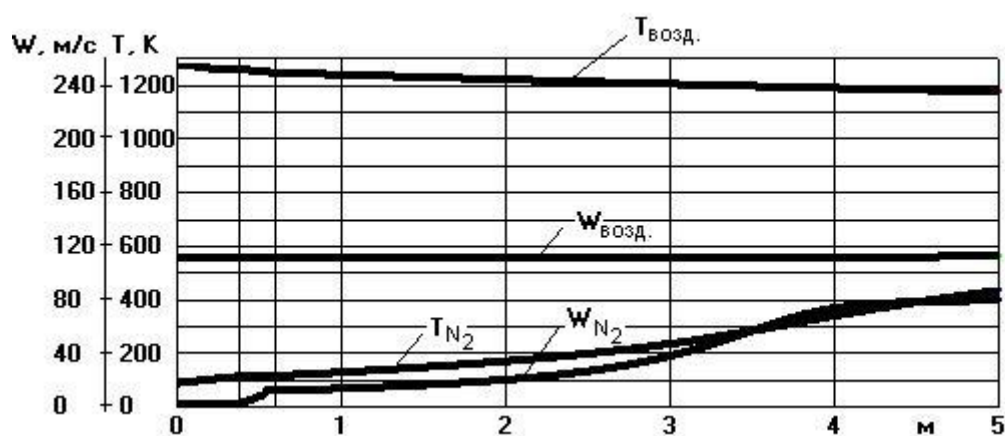


Рис. 7.6. Расчетное изменение температуры и скорости азота и воздуха в парогенерирующем канале.

Рисунок иллюстрирует ход кривых скорости и температуры агентов вдоль канала на экономайзерном, парогенерирующем и участке перегрева пара. На участке парообразования учитывается скольжение между фазами.

Раздел II. Движение частиц и двухфазного потока в криволинейных каналах

В разделе I рассматривалось движение двухфазного и вскипающего потоков в каналах переменного сечения с прямой осью. Однако во многих случаях в энергетических машинах и аппаратах имеет место движение однокомпонентных или многокомпонентных гетерогенных потоков в криволинейных каналах (решетки турбомашин, колена трубопроводов и т.д.) с частичным или полным инерционным выпадением отдельных компонент на стенках канала. В связи с вышесказанным возникает необходимость в изучении таких потоков.

8. Движение капли в сепараторе влаги

Пар, движущийся в паропроводах энергетических систем, когда его параметры близки к состоянию насыщения, из-за теплоотдачи в окружающую среду становится влажным. Однако, например, работа турбины на влажном паре снижает ее внутренний относительный к.п.д., приводит к эрозионному износу лопаток, уменьшает срок ее эксплуатации. Для борьбы с этими негативными явлениями применяют сепараторы влаги. Существует множество типов сепараторов влаги и частиц, но большинство из них основаны на использовании центробежного эффекта. Между двумя коаксиальными цилиндрами по касательной через патрубок подводится влажный пар. В результате возникающих при движении по окружности ускорений, частицы отбрасываются к наружному цилиндру. Капли, выпавшие на стенку, образуют пленку, которая стекает в нижнюю часть сепаратора. Отсепарированная влага удаляется через патрубок. Для предотвращения срыва жидкости с поверхности пленки паровым потоком (т.е. вторичного увлажнения потока) скорость входящего в сепаратор пара не должна быть слишком высокой, обычно она составляет $c_{\text{ПФ}} \approx 20 \dots 30$ м/с. С этой же целью в нижней части сепаратора устанавливается коническая крышка. На рис.8.1 показана возможная конструкция противоточного сепаратора влаги. Чтобы понять принцип действия сепаратора, рассмотрим вначале основные положения движения материальной точки (см. рис.8.2).

В полярной системе координат абсолютная скорость точки M , движущейся в плоскости по траектории AB , может быть разложена на относительную

скорость $c_\rho = \frac{d\rho}{d\tau} = \dot{\rho}$, направленную вдоль радиус-вектора ρ , и на переносную

$c_\varphi = \frac{\rho d\varphi}{d\tau} = \rho \dot{\varphi}$, перпендикулярную радиус-вектору. Так как скорости c_ρ и c_φ

взаимно перпендикулярны, то $c = \sqrt{c_\rho^2 + c_\varphi^2}$, а $\cos(\hat{c}_\rho c) = \frac{c_\rho}{c}$, $\cos(\hat{c}_\varphi c) = \frac{c_\varphi}{c}$ (см.

рис. 8.2). Абсолютное ускорение точки складывается из относительного

ускорения $a_\rho = \frac{dc_\rho}{d\tau} = \ddot{\rho}$, направленного по радиусу-вектору, переносного \vec{a}_e , которое состоит из переносного касательного $\vec{a}_{e\tau}$ и переносного нормального

$$\vec{a}_{en}, \vec{a}_e = \vec{a}_{e\tau} + \vec{a}_{en}, a_e = \rho \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + \rho \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right)^2 = \rho \ddot{\varphi} + \rho \dot{\varphi}^2, \text{ и кориолисова ускорения}$$

$\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{c}$, которое по направлению совпадает с

$$\vec{a}_{e\tau}, a_c = 2 \frac{d\varphi}{d\tau} c_\rho \sin(\hat{\vec{\omega}} \hat{\vec{c}}_\rho) = 2 \dot{\varphi} \dot{\rho}.$$

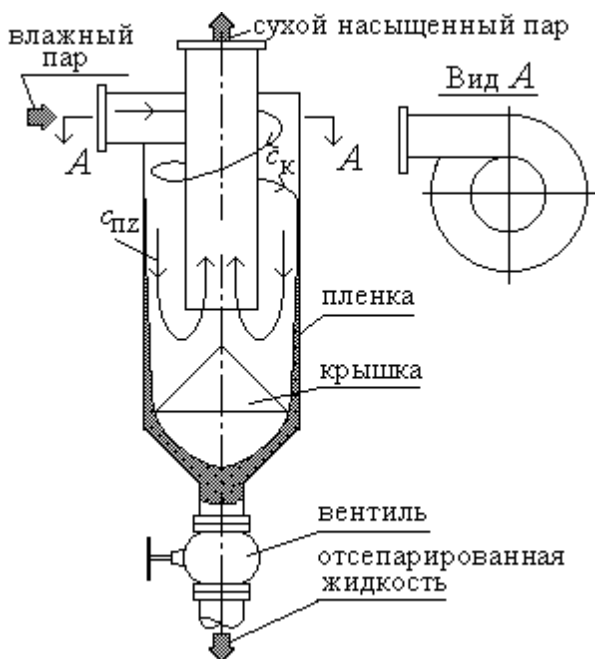


Рис. 8.1

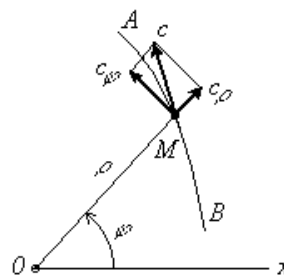


Рис. 8.2

Абсолютное ускорение точки складывается из относительного ускорения $a_\rho = \frac{dc_\rho}{d\tau} = \ddot{\rho}$, направленного по радиусу-вектору, переносного \vec{a}_e , которое состоит из переносного касательного $\vec{a}_{e\tau}$ и переносного

нормального \vec{a}_{en} , $\vec{a}_e = \vec{a}_{e\tau} + \vec{a}_{en}$, $a_e = \rho \frac{d^2\varphi}{d\tau^2} + \rho \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right)^2 = \rho \ddot{\varphi} + \rho \dot{\varphi}^2$, и кориолисова ускорения $\vec{a}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{c}$, которое по направлению совпадает с $\vec{a}_{e\tau}, a_c = 2 \frac{d\varphi}{d\tau} c_\rho \sin(\hat{\vec{\omega}} \hat{\vec{c}}_\rho) = 2 \dot{\varphi} \dot{\rho}$. Из рисунка 8.3 видно, что проекция ускорения точки на радиальное направление равна

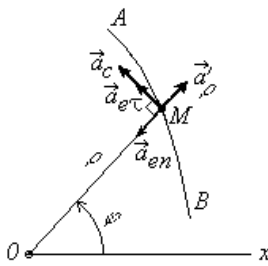
$$a_\rho = a'_\rho - a_{en} = \frac{dc_\rho}{d\tau} - \rho \omega^2 = \frac{dc_\rho}{d\tau} - \frac{c_\varphi^2}{\rho}.$$

На направлении, перпендикулярном радиус-вектору, будем иметь

$$\begin{aligned} a_\varphi &= a_{e\tau} + a_c = \rho \frac{d\omega}{d\tau} + 2\omega c_\rho = \rho \frac{d\omega}{d\tau} + 2 \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho} = \rho \frac{d}{d\tau} \left(\frac{c_\varphi}{\rho} \right) + 2 \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho} = \\ &= \frac{\rho \left(\rho \frac{dc_\varphi}{d\tau} - c_\varphi \frac{d\rho}{d\tau} \right)}{\rho^2} + 2 \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho} = \frac{dc_\varphi}{d\tau} - \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho} + 2 \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho} = \frac{dc_\varphi}{d\tau} + \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho}. \end{aligned}$$

Таким образом, мы получили, что $a_\rho = \frac{dc_\rho}{d\tau} - \frac{c_\varphi^2}{\rho}$,

$$a_\varphi = \frac{dc_\varphi}{d\tau} + \frac{c_\varphi c_\rho}{\rho}.$$



В цилиндрической системе координат уравнения примут вид (см. рис.8.4)

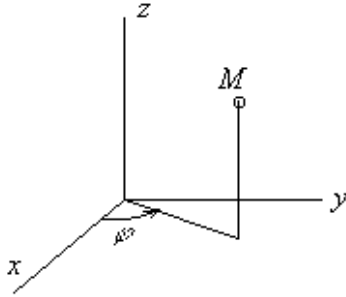


Рис. 8.4

$$c_\rho = \dot{\rho}, \quad c_\varphi = \rho \dot{\varphi}, \quad c_z = \dot{z},$$

$$c = \sqrt{c_\rho^2 + c_\varphi^2 + c_z^2},$$

$$\cos(\hat{c}_\rho \rho) = \frac{\dot{\rho}}{c}, \quad \cos(\hat{c}_\varphi \varphi) = \frac{\rho \dot{\varphi}}{c},$$

$$\cos(\hat{c}_z z) = \frac{\dot{z}}{c},$$

$$a_\rho = \ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2, \quad a_\varphi = \rho \ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}, \quad a_z = \ddot{z}, \quad a = \sqrt{a_\rho^2 + a_\varphi^2 + a_z^2},$$

$$\cos(\hat{a}_\rho \rho) = \frac{\ddot{\rho} - \rho \dot{\varphi}^2}{a}, \quad \cos(\hat{a}_\varphi \varphi) = \frac{\rho \ddot{\varphi} + 2\dot{\rho}\dot{\varphi}}{a}, \quad \cos(\hat{a}_z z) = \frac{\ddot{z}}{a}.$$

Перейдем к рассмотрению движения капли в сепараторе влаги. Согласно закону Ньютона, сила инерции уравновешивается силами, приложенными к телу $G\vec{a} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i$. Так как сила аэродинамического сопротивления намного больше массовых сил в поле тяжести и сил давления, то в координатной форме для капли, используя ранее полученные выражения, можно написать

$$G_K \left(\frac{dc_{Kr}}{d\tau} - \frac{c_{Ku}^2}{r} \right) = c_x \frac{\pi D_K^2}{8} \rho_\Pi (c_{\Pi r} - c_{Kr}) \Delta c_{отн},$$

$$G_K \left(\frac{dc_{Ku}}{d\tau} + \frac{c_{Ku} c_{Kr}}{r} \right) = c_x \frac{\pi D_K^2}{8} \rho_\Pi (c_{\Pi u} - c_{Ku}) \Delta c_{отн},$$

$$G_K \frac{dc_{Kz}}{d\tau} = c_x \frac{\pi D_K^2}{8} \rho_\Pi (c_{\Pi z} - c_{Kz}) \Delta c_{отн},$$

где $G_K = \rho_K \frac{\pi D_K^3}{6}$ - масса капли; $\Delta c_{отн} = \sqrt{(c_{\Pi r} - c_{Kr})^2 + (c_{\Pi u} - c_{Ku})^2 + (c_{\Pi z} - c_{Kz})^2}$ - относительная скорость.

С учетом уравнения линии тока $\frac{dr}{c_{Kr}} = \frac{rd\varphi}{c_{Ku}} = \frac{dz}{c_{Kz}}$ преобразуем уравнения

движения к виду

$$\begin{aligned}\frac{dc_{Kr}}{dr} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K D_K} (c_{\Pi r} - c_{Kr}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Kr}} + \frac{c_{Ku}^2}{c_{Kr} r}, \\ \frac{dc_{Ku}}{d\varphi} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} r}{\rho_K D_K} (c_{\Pi u} - c_{Ku}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Ku}} - c_{Kr}, \\ \frac{dc_{Kz}}{dz} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K D_K} (c_{\Pi z} - c_{Kz}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Ku}}.\end{aligned}$$

Полагая $c_{\Pi r} = 0$, получим

$$\frac{dc_{Kr}}{dr} = \frac{c_{Ku}^2}{c_{Kr} r} - \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} \Delta c_{\text{отн}}}{\rho_K D_K}. \quad (*)$$

При входе влажного пара в сепаратор $c_{Kr} = 0$, следовательно, $\frac{dc_{Kr}}{dr} = \infty$ и запись уравнений в таком виде становится непригодна для численной реализации. Однако если записать их в виде производных по φ , проблема исчезает. Действительно,

$$\begin{aligned}\frac{dc_{Kr}}{d\varphi} &= c_{Ku} - \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} r}{\rho_K D_K} \frac{\Delta c_{\text{отн}} c_{Kr}}{c_{Ku}}, \\ \frac{dc_{Ku}}{d\varphi} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} r}{\rho_K D_K} \left(\frac{c_{\Pi u}}{c_{Ku}} - 1 \right) \Delta c_{\text{отн}} - c_{Kr}, \\ \frac{dc_{Kz}}{d\varphi} &= \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} r}{\rho_K D_K} \left(\frac{c_{\Pi z}}{c_{Kz}} - 1 \right) \frac{\Delta c_{\text{отн}} c_{Kz}}{c_{Ku}}.\end{aligned}$$

При расчете движения капле в сепараторе считалось, что $c_{\Pi \varphi} = c_{\Pi \varphi 0} \cdot r_{cp} / r$, где $r_{cp} = (r_{нар} + r_{вн}) / 2$, а $c_{\Pi r} = 0$. Влияние капле на паровой поток не учитывалось, $c_{\Pi z} = \text{const}$.

На основании приведенных формул составлена программа SEPARATOR, позволяющая рассчитывать движение капле в сепараторе. Результаты расчета

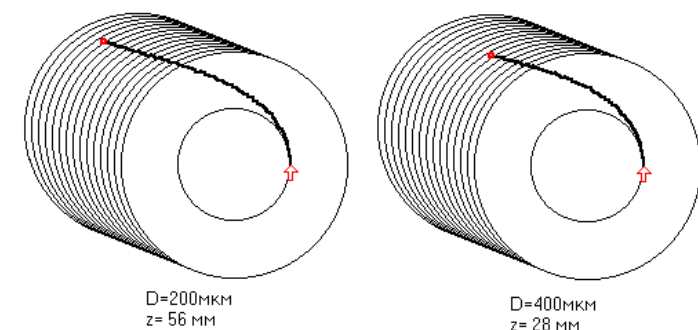


Рис. 8.5

представлены на рис.8.5, текст программы - в приложении №6.

9. Движение двухфазного потока в криволинейном канале

В предыдущем параграфе рассмотрено движение капле в сепараторе влаги, определялась точка встречи капле со стенкой, движение же пленки, образовавшейся в результате выпадения капле на стенку, не рассматривалось. Решение задачи о течении паракапельного потока и пленки в каналах в трехмерной постановке представляет сложную научную проблему диссертационного плана, поэтому ограничимся рассмотрением движения

двухфазного потока в плоском криволинейном канале на примере расчета межлопаточного канала гидropаровой турбины (ГПТ), работающей на вскипающем потоке. Использование ГПТ в геотермальной энергетике вместо расширителей и в энергетических системах с глубокой утилизацией теплоты повышает тепловую эффективность установок.

Будем считать, что на входе в канал высоковлажный парокapельный поток имеет неравновесную структуру ($T_k > T_n$, $\bar{w}_k \neq \bar{w}_n$), несущий паровой поток полностью заполняет канал, радиальная составляющая скорости парового потока $w_{pr} = 0$, а тангенциальная проекция зависит от радиуса по закону $w_{п\phi} \cdot r = \text{const}$, где r - текущий радиус канала, срыв жидкости с поверхности пристенного жидкостного слоя отсутствует. При расчете будем учитывать влияние на поток касательного напряжения трения на стенке τ_w и силу сопротивления капель, которая снижает среднюю скорость несущего парового потока на 15...17%. Для того чтобы ответить на вопрос, правомерно ли использование модели плоского канала при наличии вращения, когда на поток действуют центробежные и кориолисовы силы, необходимо оценить величину Δh перемещения жидкой частицы по корыту пера лопатки в направлении оси h (см. рис. 9.1).

Воспользуемся уравнением (см. §10, ф-ла 10.7a)

$$\frac{d^2 h}{d\tau^2} = \omega^2 h + 2\omega \bar{w}_{пл.u} + \frac{\bar{w}_{пл.u}^2}{h} + \sum F_{i,h}, \quad (9.1)$$

где ω - угловая скорость рабочего колеса, рад/с; h - расстояние от оси вращения, м; $\bar{w}_{пл.u}$ - проекция скорости жидкостного элемента на ось u . Пренебрегая всеми внешними силами $F_{i,h}$ в направлении h , кроме центробежных и кориолисовых сил, оценим величину Δh за время $\Delta \tau$ нахождения жидкой частицы в рабочем канале на основании опытных данных одного из режимов работы ГПТ-100 мощностью 100 кВт: $\bar{w}_{пл.u} = 33$ м/с, $\omega = 397$ с⁻¹, $l_k = 26,3$ мм (длина корыта лопатки вдоль образующей), при этом $\Delta \tau = l_k / \bar{w}_{пл.u} = 0,797 \cdot 10^{-3}$ с.

Записав уравнение второго порядка (9.1) в виде системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dh}{d\tau} = w_h \quad \text{и} \quad \frac{dw_h}{d\tau} = \omega^2 h + 2\omega \bar{w}_{пл.u} + \frac{\bar{w}_{пл.u}^2}{h},$$

где w_h - проекция скорости жидкостного элемента на ось h , и решив систему численным методом (см. программу RK1_GPT), находим, что $\Delta h = 3,03$ мм. При расчете учитывалось, что во время движения частиц по корыту лопатки направление действия кориолисовой силы меняет знак в момент времени $\Delta \tau / 2$. В действительности, величина и направление кориолисова ускорения меняются непрерывно, так как изменяет величину и направление относительная скорость

жидкой частицы \vec{w}_{nl} , а, следовательно, меняется кориолисово ускорение $\vec{a}_k = 2(\vec{\omega} \times \vec{w}_{nl})$. Проведенная оценка Δh для данных условий позволяет с достаточной точностью проводить расчет движения потока в межлопаточном канале на основе модели плоского канала.

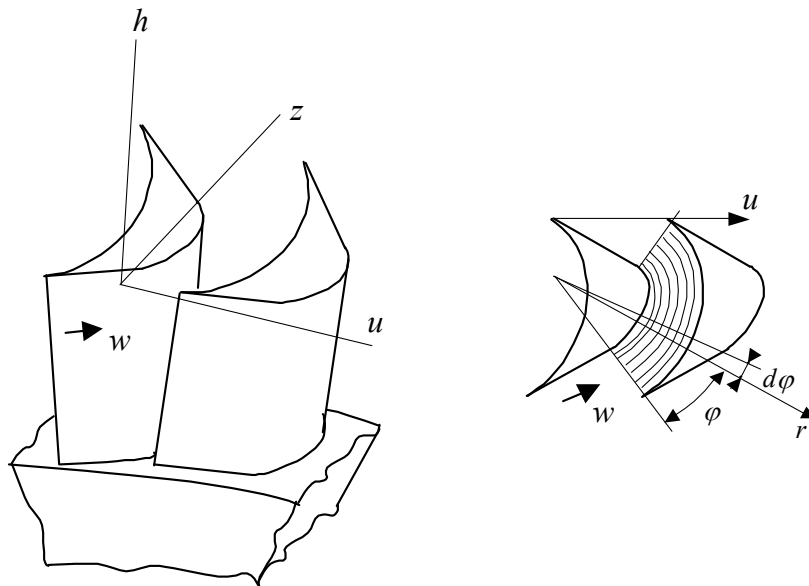


Рис. 9.1

Получим уравнения сохранения для стационарного режима течения в полярной системе координат [50-52].

Изменение секундной массы в фиксированном паровом элементе обусловлено потоками массы от испаряющихся капель ($T_k > T_n$), тогда

$$d(w_{n\varphi} \rho_n f_n) = \pi D_k^2 j_{k-n} n_v dV, \quad (9.2)$$

где dV – объем ячейки. Так как $dV = Frd\varphi$ (F – площадь поперечного сечения ячейки, $d\varphi$ – элементарный угол поворота потока), то (9.2) можно переписать в виде

$$\frac{d}{d\varphi} (w_{n\varphi} \rho_n \varphi_n) = \pi D_k^2 j_{k-n} n_v r, \quad (9.3)$$

где $\varphi_n = f_n/F$ – истинное паросодержание. После дифференцирования уравнения сплошности (9.3) имеем

$$\frac{dw_{n\varphi}}{d\varphi} = \frac{\pi D_k^2 j_{k-n} n_v r}{\rho_n \varphi_n} - \frac{w_{n\varphi}}{\rho_n} \frac{d\rho_n}{dp} \frac{dp}{d\varphi} - \frac{w_{n\varphi}}{\varphi_n} \frac{d\varphi_n}{d\varphi}. \quad (9.4)$$

Чтобы исключить в уравнении (9.4) производную $d\varphi_n/d\varphi$, найдем связь между долями пара и капель в ячейке. Из очевидных соотношений

$$dV = dV_n + dV_k, \quad \text{или} \quad \frac{dV_n}{dV} + \frac{dV_k}{dV} = 1, \quad \text{вводя обозначения} \quad \gamma_k = \frac{dV_k}{dV} = \frac{\pi D_k^3 n_v}{6} \quad \text{и}$$

$$\beta_n = \frac{dV_n}{dV}, \quad \text{получим} \quad \beta_n = 1 - \frac{\pi D_k^3 n_v}{6}.$$

Тогда

$$\frac{d\beta_{\Pi}}{d\varphi} = -\frac{\pi D_{\kappa}^2}{2} n_v \frac{dD_{\kappa}}{d\varphi}. \quad (9.5)$$

Расход капельного потока $\dot{G}_{\kappa} = \dot{n} \rho_{\kappa} \frac{\pi D_{\kappa}^3}{6}$ (\dot{n} - поток капель, 1/с) после дифференцирования по углу можно записать в виде

$$\frac{d\dot{G}_{\kappa}}{d\varphi} = \dot{n} \rho_{\kappa} \frac{\pi D_{\kappa}^2}{2} \frac{dD_{\kappa}}{d\varphi} = n_v F w_{\kappa\varphi} \rho_{\kappa} \frac{\pi D_{\kappa}^2}{2} \frac{dD_{\kappa}}{d\varphi}. \quad (a)$$

С другой стороны,

$$\frac{d\dot{G}_{\kappa}}{d\varphi} = -\pi D_{\kappa}^2 j_{\kappa-\Pi} n_v r F. \quad (b)$$

Приравнявая (a) и (b), определим производную

$$\frac{dD_{\kappa}}{d\varphi} = -\frac{2 j_{\kappa-\Pi}}{w_{\kappa\varphi} \rho_{\kappa}} r. \quad (9.6)$$

Перепишем (9.5) с учетом (9.6)

$$\frac{d\beta_{\Pi}}{d\varphi} = \frac{\pi D_{\kappa}^2 n_v j_{\kappa-\Pi} r}{w_{\kappa\varphi} \rho_{\kappa}}. \quad (9.7)$$

Можно показать, что $\beta_{\Pi} = (\varphi_{\Pi\varphi} + \varphi_{\Pi(\varphi+d\varphi)})/2$, а $d\beta_{\Pi} = d\varphi_{\Pi\varphi} + d\varphi_{\Pi\varphi}^2/2$ или $d\beta_{\Pi} \approx d\varphi_{\Pi\varphi}$. Тогда уравнение сплошности примет вид

$$\frac{dw_{\Pi\varphi}}{d\varphi} = \frac{\pi D_{\kappa}^2 n_v j_{\kappa-\Pi} r}{\varphi_{\Pi}} \left(\frac{1}{\rho_{\Pi}} - \frac{w_{\Pi\varphi}}{\rho_{\kappa} w_{\kappa\varphi}} \right) - \frac{w_{\Pi\varphi}}{\rho_{\Pi}} \frac{d\rho_{\Pi}}{d\varphi} \frac{d\varphi}{d\varphi}. \quad (9.8)$$

Для нашего случая $\frac{dw_{\Pi\varphi}}{d\tau} = 0$, $w_{\Pi r} = 0$, $\frac{dr}{d\varphi} = 0$ и $\frac{dp}{d\varphi} = \left(\frac{\partial p}{\partial r} \right) \frac{d\varphi}{dr} + \left(\frac{\partial p}{\partial \varphi} \right)_r = \left(\frac{\partial p}{\partial \varphi} \right)_r$.

Уравнение движения парового потока запишется так:

$$\frac{dw_{\Pi\varphi}}{d\varphi} = -\frac{1}{w_{\Pi\varphi} \rho_{\Pi}} \frac{dp}{d\varphi} - c_x \frac{\pi D_{\kappa}^2}{8\varphi_{\Pi}} \left(1 - \frac{w_{\kappa\varphi}}{w_{\Pi\varphi}} \right) \Delta w r n_v - \left(1 - \frac{w_{\kappa\varphi}}{w_{\Pi\varphi}} \right) \frac{\pi D_{\kappa}^2 n_v j_{\kappa-\Pi} r}{\rho_{\Pi} \varphi_{\Pi}}, \quad (9.9)$$

где $\Delta w = \sqrt{(w_{\Pi r} - w_{\kappa r})^2 + (w_{\Pi\varphi} - w_{\kappa\varphi})^2}$.

Приравнявая правые части (9.8) и (9.9), определим градиент давления по углу вдоль канала

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\varphi} = & \frac{\rho_{\Pi} w_{\Pi\varphi}}{\left(\frac{w_{\Pi\varphi}^2}{dp/d\rho_{\Pi}} - 1 \right)} \left\{ c_x \frac{\pi D_{\kappa}^2}{8\varphi_{\Pi}} \left(1 - \frac{w_{\kappa\varphi}}{w_{\Pi\varphi}} \right) \Delta w r n_v + \right. \\ & \left. + \left[\left(1 - \frac{w_{\kappa\varphi}}{w_{\Pi\varphi}} \right) + \left(1 - \frac{\rho_{\Pi} w_{\Pi\varphi}}{\rho_{\kappa} w_{\kappa\varphi}} \right) \right] \frac{\pi D_{\kappa}^2 n_v j_{\kappa-\Pi} r}{\rho_{\Pi} \varphi_{\Pi}} \right\}. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Для испаряющейся капли уравнение движения в координатной форме с учетом уравнения линии тока $\frac{dr}{w_{\kappa r}} = \frac{rd\varphi}{w_{\kappa\varphi}}$ при $w_{\Pi r} = 0$ имеет вид

$$\begin{cases} \frac{dw_{к\phi}}{d\phi} = \tilde{F} \left(\frac{w_{п\phi}}{w_{к\phi}} - 1 \right) r - w_{к\phi}, \\ \frac{dw_{к\phi}}{d\phi} = w_{к\phi} - \tilde{F} \frac{w_{к\phi}}{w_{к\phi}} r, \end{cases} \quad (9.11)$$

где $\tilde{F} = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{п\phi} \Delta w}{\rho_{к\phi} D_{к\phi}}$; $c_x = f(\text{Re}_k)$; $\text{Re}_k = \frac{D_{к\phi} \Delta w \rho_{п\phi}}{\mu_{п\phi}}$.

Разрешая уравнение количества движения испаряющегося пристенного слоя жидкости переменной массы (см. формулы 3.37, 3.43) относительно $d\bar{w}_{п\phi}/d\phi$, получим

$$\frac{d\bar{w}_{п\phi}}{d\phi} = \left(\frac{w_{к\phi} - \bar{w}_{п\phi}}{h_{рл}} \frac{d\dot{G}_{ос}}{d\phi} - \delta_{п\phi} \frac{dp}{d\phi} - \tau_w R_{рл} + \tau_{п-п\phi} (R_{рл} - \delta_{п\phi}) \right) / (\bar{w}_{п\phi} \delta_{п\phi} \rho_{п\phi}), \quad (9.12)$$

где $h_{рл}$ – высота канала, $R_{рл}$ – радиус корыта рабочей лопатки.

При расчете пристенного слоя жидкости капля считалась выпавшей, если ее траектория пересекает поверхность слоя, при этом слой получает секундную массу жидкости $d\dot{G}_{ос} = \dot{n}' \pi D_{к\phi}^3 \rho_{к\phi} d\phi/6$, где $\dot{n}' = \dot{n}/z_{яч}$ – элементарный поток капель, проходящий через одну ячейку первого по углу ряда. Начало траекторий капель, имеющих размер $D_{к\phi}$ и условно содержащих массу всех пересекающих ячейку капель – в серединах граней ячеек на входе в расчетную область.

Из уравнения сплошности испаряющегося пристенного слоя при отсутствии срыва жидкости с его поверхности находим

$$\frac{d\delta_{п\phi}}{d\phi} = \left[\frac{1}{h_{рл}} \frac{d\dot{G}_{ос}}{d\phi} - j_{п\phi-п} (R_{рл} - \delta_{п\phi}) \right] / (\bar{w}_{п\phi} \rho_{п\phi}) - \frac{\delta_{п\phi}}{\bar{w}_{п\phi}} \frac{d\bar{w}_{п\phi}}{d\phi}. \quad (9.13)$$

Записав уравнение теплового баланса между каплей и паровым потоком, определим изменение температуры капли по углу

$$\frac{dT_{к\phi}}{d\phi} = - \frac{6r}{\rho_{к\phi} D_{к\phi} c_{pк\phi} w_{к\phi}} (\alpha_{к-п} (T_{к\phi} - T_{п\phi}) + \tilde{r} j_{к-п}), \quad (9.14)$$

где \tilde{r} – удельная теплота парообразования, Дж/кг. Производную $\frac{dT_{п\phi}}{d\phi}$ найдем

из уравнения энергии с учетом материального баланса, составленного для фиксированного элемента пристенного слоя

$$\begin{aligned} \frac{dT_{п\phi}}{d\phi} = \frac{1}{c_{pп\phi} \dot{G}_{п\phi}} & \left\{ (i_{к\phi}^* - i_{п\phi}^*) \frac{d\dot{G}_{ос}}{d\phi} - \left[(i_{п\phi}^* (T_{п\phi}) - i_{п\phi}^*) j_{п\phi-п} + \alpha_{п\phi-п} (T_{п\phi} - T_{п\phi}) \right] \right\} \times \\ & \times (R_{рл} - \delta_{п\phi}) h_{рл} \left. \right\} - \frac{\bar{w}_{п\phi}}{c_{pп\phi}} \frac{d\bar{w}_{п\phi}}{d\phi}. \end{aligned} \quad (9.15)$$

Концентрация капель в ячейке определяется выражением

$$n_v = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{n}'_i dl_i}{r d\phi dr h_{рл}}, \quad (9.16)$$

где dl_i – длина траектории единичной капли внутри ячейки.

Полученная система уравнений является замкнутой и позволяет определить $w_{пф}, w_{кф}, w_{кр}, p, D_k, T_k, \bar{w}_{пл}, \delta_{пл}, T_{пл}$ и $T_{п} = f(p)$ вдоль рабочего канала.

Определив изменение количества движения потока в рабочем колесе ГПТ, найдем мощность ступени

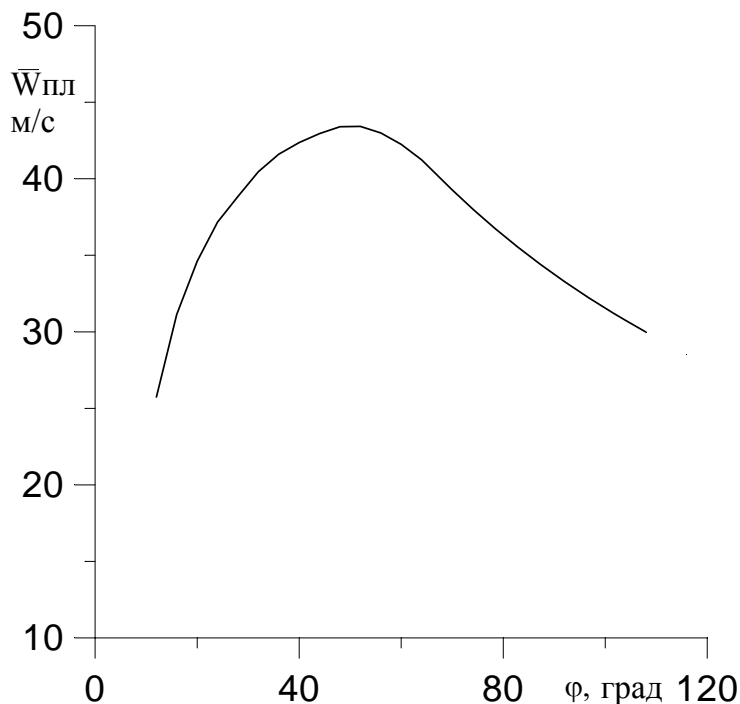
$$N_{ГПТ} = \left[\left(\dot{G}_{п} w_{пу} + \dot{G}_{к} w_{ку} \right)_{вх} - \left(\dot{G}_{п} w_{пу} + \dot{G}_{к} w_{ку} + \dot{G}_{пл} \bar{w}_{пли} \right)_{вых} \right] z_{рл} u, \quad (9.17)$$

где $z_{рл}$ – число рабочих лопаток, u – окружная скорость на среднем диаметре колеса.

Задача о движении двухфазного потока в рабочем колесе ГПТ решалась в два этапа: на первом определялась концентрация капель в данной области канала, на втором рассчитывались параметры потока с учетом концентрации жидкой фазы. Число капельных струек равнялось числу ячеек, на которые разбит канал вдоль направления r .

Система уравнений движения капель в ячейке решалась методом Рунге-Кутты-Фельдберга пятого порядка точности [27]. После нахождения скорости и радиуса выхода капельной струи из каждой ячейки первого (по углу) столбца определялась концентрация капель в этой ячейке. Затем для этого же столбца решалась полная система уравнений с учетом найденной концентрации и проводилось уточнение величины концентрации капель. Если радиус выхода капельной струи стал равным радиусу пленки жидкости, то считалось, что все капли этой группы выпали в пленку и число капельных струй уменьшалось на единицу. После расчета движения капель и пара в данном столбце вычислялось движение пленки жидкости в пределах шага $\Delta\varphi$, определяющего данный столбец ячеек. Выходные параметры текущего столбца являются входными для следующего, и расчет повторяется. Плотность пара, вязкость пара и жидкости, температура пара, энтальпия пара и жидкости в зависимости от давления аппроксимировались с помощью кубических сплайнов. Решение полученной системы уравнений реализовано в программе TURB_8D (приложение №6). Высоковлажный парокapельный поток, входящий в рабочий канал, генерировался соплами с парогенерирующими решетками (программа LAV_27B). На выходе из канала определялось движение капель, образовавшихся в результате дробления пленки при ее сходе с пера лопатки. Для расчета использованы данные одного из режимов работы ГПТ-100: расход горячей воды через турбину $\dot{G}_{ГВ} = 1,73$ кг/с, давление $p = 0,473$ МПа и температура горячей воды на входе в турбину $T_0^* = 421$ К. Результаты расчета показали, что относительная погрешность определения мощности турбины

$$\varepsilon_{\Delta N} = \frac{N_d - N_{расч}}{N_d} \cdot 100 = \frac{9,67 - 9,53}{9,67} \cdot 100 = 1,45\%.$$



На рис.9.2 представлена зависимость средней скорости пленки при ее движении вдоль корыта рабочей лопатки, которая получена после интегрирования уравнения (9.12). Рост скорости пленки на начальном участке корыта рабочей лопатки обусловлен преобладанием потока количества движения, вносимого капельным потоком в пленку, над силой трения между пленкой и стенкой. С уменьшением количества капель, выпадающих в пленку, определяющей становится сила трения между пленкой и стенкой,

и скорость пленки уменьшается.

В экспериментальной турбине ГПТ-100 сопловой аппарат состоит из 20 блоков, в каждом из которых находится 3 сопла с парогенерирующими решетками (в опытах работало только 3 блока).

При полном подводе воды ($p_0^* = 0,6 \text{ МПа}$, $T_0^* = 428 \text{ К}$, $p_{np} = 0,1 \text{ МПа}$) к сопловому аппарату действительная мощность турбины составила бы 64,49 кВт, а расход горячей воды - 11,53 кг/с.

10. Движение капли в относительной системе координат

Чтобы понять процессы, протекающие в рабочем канале турбины, работающей на парокapельном потоке, необходимо изучить движение материальной точки (капли) в относительной системе координат. Рассмотрим две системы координат: неподвижную и вращающуюся. Во вращающейся системе имеется материальная точка M , которая движется относительно подвижной координатной системы. Положение точки в системах определяется радиус-векторами (см. рис.10.1). Для подвижной системы можно написать

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (a)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ - единичные орты, которые, как и x, y, z , являются функциями времени. Радиус-вектор точки M относительно центра \bar{O} неподвижной системы запишем в виде

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r} = \vec{r}_0 + x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}. \quad (b)$$

Дифференцируя (b) по времени, получим абсолютную скорость точки M относительно неподвижной точки \bar{O}

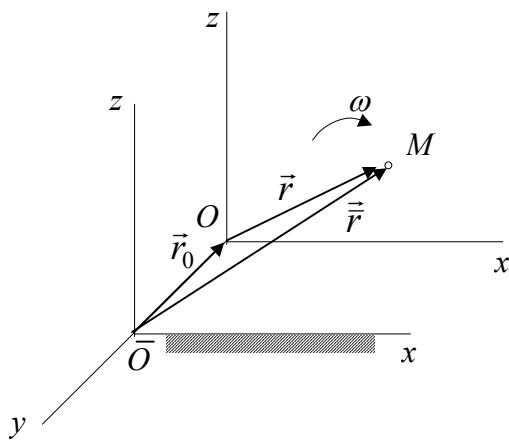


Рис. 10.1

$$\vec{c} = \frac{d\vec{r}}{d\tau} = \frac{d\vec{r}_0}{d\tau} + x \frac{d\vec{i}}{d\tau} + y \frac{d\vec{j}}{d\tau} + z \frac{d\vec{k}}{d\tau} + \frac{dx}{d\tau} \vec{i} + \frac{dy}{d\tau} \vec{j} + \frac{dz}{d\tau} \vec{k} \quad (c)$$

Выражение $\frac{d\vec{r}_0}{d\tau} + x \frac{d\vec{i}}{d\tau} + y \frac{d\vec{j}}{d\tau} + z \frac{d\vec{k}}{d\tau}$ при постоянных x, y, z представляет переносную скорость u в подвижной системе координат [28], которая в векторной форме имеет вид $u = \vec{c}_0 + \vec{\omega} \times \vec{r}$, (d)

где \vec{c}_0 - абсолютная скорость начала координат O подвижной системы, $\vec{\omega}$ - вектор мгновенной угловой скорости

подвижной системы. Последние три слагаемые в уравнении (c) представляют относительную скорость

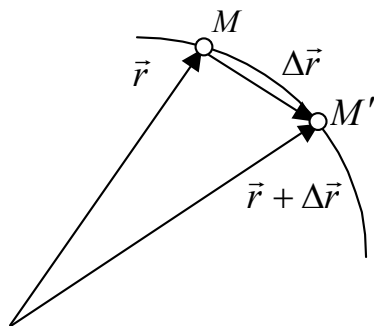


Рис. 10.2

$$\vec{w} = \frac{dx}{d\tau} \vec{i} + \frac{dy}{d\tau} \vec{j} + \frac{dz}{d\tau} \vec{k}, \quad (e)$$

так как $\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \frac{\overline{MM'}}{\Delta\tau} = \vec{w}$ (см. рис.10.2). Если $\vec{r}_0=0$, то $c_0=0$, а $u = \vec{\omega} \times \vec{r}$, тогда

$$\vec{c} = \frac{d\vec{r}}{d\tau} = \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (10.1)$$

или $\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}. \quad (10.2)$

Дифференцируя по времени уравнение (c), получим выражение для абсолютного ускорения

материальной точки относительно \vec{O}

$$\begin{aligned} \vec{a} = \frac{d\vec{c}}{d\tau} &= \left(\frac{d^2\vec{r}_0}{d\tau^2} + x \frac{d^2\vec{i}}{d\tau^2} + y \frac{d^2\vec{j}}{d\tau^2} + z \frac{d^2\vec{k}}{d\tau^2} \right) + \\ &+ 2 \left(\frac{dx}{d\tau} \frac{d\vec{i}}{d\tau} + \frac{dy}{d\tau} \frac{d\vec{j}}{d\tau} + \frac{dz}{d\tau} \frac{d\vec{k}}{d\tau} \right) + \left(\frac{d^2x}{d\tau^2} \vec{i} + \frac{d^2y}{d\tau^2} \vec{j} + \frac{d^2z}{d\tau^2} \vec{k} \right) = \\ &= \vec{a}_u + \vec{a}_k + \vec{a}_w = \vec{a}_0 + \dot{\vec{\omega}} \times \vec{r} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) + 2(\vec{\omega} \times \vec{w}) + \vec{a}_w, \end{aligned} \quad (10.3)$$

где $\vec{a}_u, \vec{a}_k, \vec{a}_w$ - соответственно вектора переносного, кориолисова и относительного ускорения точки.

Запишем уравнение движения капли при постоянной скорости вращения рабочего колеса турбины $\omega = \text{const}$

$$\left[\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2(\vec{\omega} \times \vec{w}_k) + \vec{\omega} \times \vec{u} \right] G_k = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i, \quad (10.4)$$

где $G_k = \rho_k \pi D_k^3 / 6$ - масса капли, $\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2(\vec{\omega} \times \vec{w}_k) + \vec{\omega} \times \vec{u}$ - абсолютное ускорение

капли, $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$ - сумма всех внешних сил, действующих на каплю в абсолютной системе координат.

Перейдем от абсолютной к относительной системе координат. Проектируя (10.2) на оси координат, получим: $c_r = w_r$, $c_u = w_u + u$, $c_z = w_z$, $c_{пу} - c_{ку} = w_{пу} + u - w_{ку} - u = w_{пу} - w_{ку}$, $\Rightarrow \Delta c_{отн} = \Delta w_{отн}$. Теперь вместо (10.4) можем написать:

$$\left[\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2(\vec{\omega} \times \vec{w}_k) + \vec{\omega} \times \vec{u} \right] G_k = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{iотн}.$$

В цилиндрической системе координат, раскрывая векторные произведения, будем иметь

$$\begin{aligned} G_k \left[\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2(\omega_z w_{kr} - \omega_r w_{kz}) \vec{i}_u + 2(\omega_u w_{kz} - \omega_z w_{ku}) \vec{i}_r + \right. \\ \left. + 2(\omega_u w_{kr} - \omega_r w_{ku}) \vec{i}_z + (\omega_z u_r - \omega_r u_z) \vec{i}_u + (\omega_u u_z - \omega_z u_u) \vec{i}_r + \right. \\ \left. + (\omega_u u_r - \omega_r u_u) \vec{i}_z \right] = \sum_{i=1}^n F_{iотн}. \end{aligned} \quad (10.5)$$

Совмещая направление вектора $\vec{\omega}$ с продольной осью турбины OZ , получим

$$\left[\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2\omega_z (w_{kr} \vec{i}_u - w_{ku} \vec{i}_r) - \omega_z^2 r \vec{i}_r \right] G_k = \sum_{i=1}^n F_{iотн}. \quad (10.6)$$

В координатной форме в относительной системе координат для испаряющейся капли, движущейся в потоке насыщенного пара (в этом случае отсутствует сила Мещерского), можно написать

$$G_k \frac{dw_{kr}}{d\tau} = \left(\frac{w_{ku}^2}{r} + 2\omega w_{ku} + \omega^2 r \right) G_k - V_k \frac{\partial p}{\partial r} + c_x \rho_{\Pi} \frac{(w_{пр} - w_{kr})}{8} \Delta w_{отн} \pi D_k^2, \quad (10.7a)$$

$$G_k \frac{dw_{ku}}{d\tau} = - \left(\frac{w_{kr} w_{ku}}{r} + 2\omega w_{kr} + r \frac{d\omega}{d\tau} \right) G_k - \frac{V_k}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + c_x \rho_{\Pi} \frac{(w_{пу} - w_{ku})}{8} \Delta w_{отн} \pi D_k^2, \quad (10.7b)$$

$$G_k \frac{dw_{kz}}{d\tau} = -V_k \frac{\partial p}{\partial z} + c_x \rho_{\Pi} \frac{(w_{пз} - w_{kz})}{8} \Delta w_{отн} \pi D_k^2, \quad (10.7c)$$

где $V_k = \frac{\pi D_k^3}{6}$, $c_x = f(\text{Re}_k)$, $\text{Re}_k = \frac{\Delta w_{отн} D_k}{\nu_{\Pi}}$,

$\Delta w_{отн} = \sqrt{(w_{пр} - w_{kr})^2 + (w_{пу} - w_{ку})^2 + (w_{пз} - w_{kz})^2}$, ω - угловая скорость вращения ротора турбины.

Записав систему уравнений (10.7) относительно производных от проекций скорости по углу с учетом уравнения линии тока и считая аэродинамическую силу сопротивления определяющей, получим систему уравнений вида

$$\frac{dw_{kr}}{d\varphi} = \frac{\omega^2 r^2}{w_{ku}} + 2\omega r + w_{ku} + \frac{3}{4} c_x r \frac{\Delta w_{отн}}{w_{ku} D_k} \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k} (w_{пр} - w_{kr}),$$

$$\frac{dw_{ku}}{d\varphi} = - \frac{2\omega w_{kr} r}{w_{ku}} - w_{kr} + \frac{3}{4} c_x r \frac{\Delta w_{отн}}{w_{ku} D_k} \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k} (w_{пу} - w_{ку}),$$

$$\frac{dw_{kz}}{d\varphi} = \frac{3}{4} c_x r \frac{\Delta w_{отн}}{w_{ku} D_k} \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_k} (w_{пз} - w_{kz}),$$

решение которой реализовано в программе RK_GPT (приложение №6), позволяющей определить траекторию капли, движущейся между двумя коаксиальными цилиндрами, вращающимися вокруг продольной оси с постоянной угловой скоростью ω .

Рассмотрим более сложную задачу. Определим траекторию капли между двумя рабочими лопатками влажно-паровой турбины, ротор которой вращается с постоянной угловой скоростью ω . После выпадения капли на поверхность корыта рабочей лопатки изучим движение жидкостного элемента по поверхности лопатки. В этом случае в правую часть приведенных выше уравнений добавляется сила трения, возникающая при движении элемента по поверхности и сила трения, обусловленная реакцией стенки из-за наличия кривизны поверхности. Остановимся на вопросе движения жидкостного элемента по поверхности лопатки более подробно.

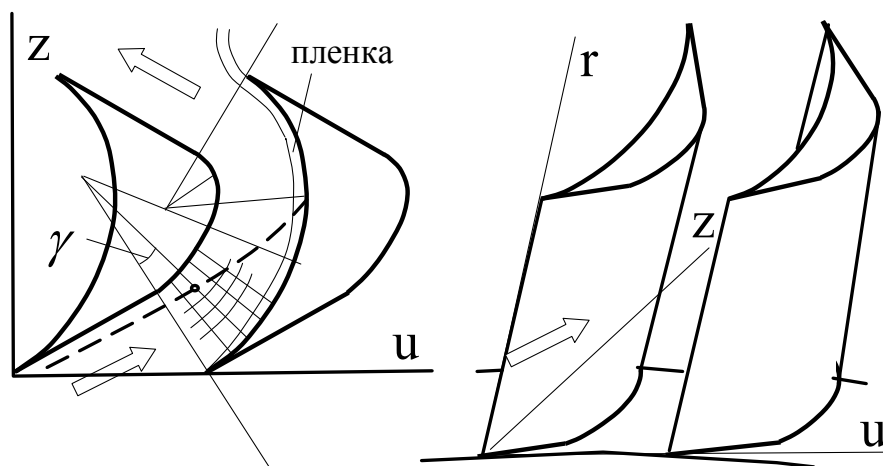


Рис.10.3

Для определенности будем рассматривать движение капель в межлопаточном канале, изображенном на рис.10.3. Трехмерный канал образован поверхностями рабочих лопаток (спинки и корыта), обода и бандажа рабочего колеса. Положение капли, летящей в межлопаточном канале или движущейся по поверхности, задается в ортогональной относительной системе координат r - z - u . В численном расчете траектории капли момент касания поверхности лопатки определяется по равенству текущей координаты капли u и координаты корытца u_k при текущих значениях r и z . Касание поверхности бандажа определяется по условию $r \geq r_b$, где r_b - радиус бандажа рабочего колеса. В зависимости от результата проверки модифицируется система уравнений движения жидкого элемента по твердой поверхности. В случае касания лопатки необходимо определить вектор скорости капли в момент касания. Принято, что после удара о поверхность гасится нормальная к поверхности составляющая скорости капли, а тангенциальная остается без изменения. Определение нормальной и тангенциальной составляющих скорости капли ведется методами аналитической геометрии следующим образом. Составляющие скорости капли w_{dr} , w_{dz} , w_{du} определяют компоненты

направляющего вектора элемента прямой, изображающей траекторию частицы в данной точке пространства. Полагая, что поверхность лопатки сформирована совокупностью элементарных плоскостей (см. рис.10.4), определим угол ψ между вектором скорости падающей капли и поверхностью лопатки в момент касания. Уравнение поверхности может быть найдено, так как для каждой из них известны компоненты вектора нормали

$$A = \cos \frac{\pi}{n_{\pi}}, B = \cos\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right), C = \sin\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right),$$

где γ - текущий угол поворота, n_{π} - число лопаток на рабочем колесе. Угол между прямой и плоскостью определяется по формуле

$$\sin \psi = \frac{|A \cdot w_{dr} + B \cdot w_{dz} + C \cdot w_{du}|}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \sqrt{w_{dr}^2 + w_{dz}^2 + w_{du}^2}}.$$

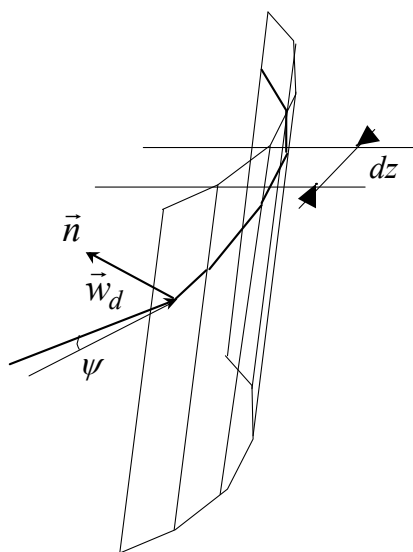


Рис. 10.4

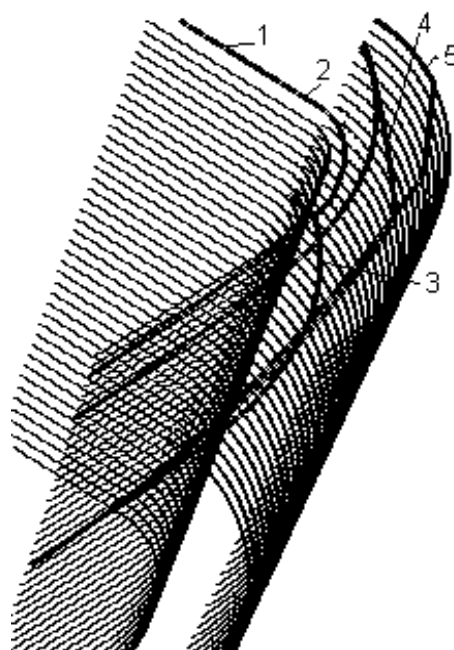


Рис. 10.5

Зная угол, можно определить нормальную и тангенциальную составляющие скорости капли $w_{dn} = w_d \sin \psi$; $w_{d\tau} = w_d \cos \psi$.

При движении жидкостного элемента по поверхности лопатки остается только тангенциальная проекция. По мере движения эта скорость будет уменьшаться из-за действия сил трения.

При решении задачи о движении капли в рабочем канале использовалось уравнение

$$\left[\frac{d\vec{w}_k}{d\tau} + 2(\vec{\omega} \times \vec{w}_k) + \vec{\omega} \times \vec{u} \right] G_k = \sum_{i=1}^n \vec{F}_{i\text{отн}},$$

которое в координатной форме с учетом уравнения линии тока $\frac{dr}{w_{kr}} = \frac{dz}{w_{kz}} = \frac{rd\varphi}{w_{ku}}$

(здесь z - продольная ось турбины) приводилось к виду:

$$\frac{dw_{kz}}{dz} = \frac{3}{4} c_x (\text{Re}_k) \frac{\Delta w_{\text{отн}}}{D_k} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_k} (w_{\text{пз}} - w_{kz}) / w_{kz}, \quad (\text{a})$$

$$\frac{dw_{kr}}{dz} = (\omega^2 r + 2\omega w_{ku} + \frac{w_{ku}^2}{r} + \frac{3}{4} c_x (\text{Re}_k) \frac{\Delta w_{\text{отн}}}{D_k} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_k} (w_{\text{пр}} - w_{kr})) / w_{kz}, \quad (\text{b})$$

$$\frac{dw_{ku}}{dz} = (-2\omega w_{kr} - \frac{w_{ku} w_{kr}}{r} + \frac{3}{4} c_x (\text{Re}_k) \frac{\Delta w_{\text{отн}}}{D_k} \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_k} (w_{\text{пу}} - w_{ku})) / w_{kz}. \quad (\text{c})$$

Если капля находилась в полете, то при расчете применялись все три уравнения. При движении капли по вогнутой поверхности пера лопатки

($\frac{dw_{ku}}{dz} = 0, w_{ku} = 0$) и бандажу ($\frac{dw_{kr}}{dz} = 0, w_{kr} = 0$) учитывалась сила трения. В этом

случае из правой части уравнения (b) вычиталась сила трения приведенная к

массе капли $\frac{3c_f w_{kr}^2 f_k}{\pi D_k^3 w_{kz}}$, где $f_k = \frac{\varepsilon \pi D_k^2}{4}$ - площадь контакта капли с поверхностью

($\varepsilon = 0 \div 1$), а из (a) - $\frac{3c_f w_{kz} f_k}{\pi D_k^3}$. Считалось, что при движении пара в рабочем

канале $w_{\text{пр}} = 0, w_{\text{пз}} = w_{\text{пг}} \sin \gamma, w_{\text{пу}} = w_{\text{пг}} \cos \gamma$, а скорость $w_{\text{пг}}$ в радиальном

направлении изменяется по закону $w_{\text{пг}} = w_{\text{п1}} (R_2 - R_1) / R \ln \frac{R_2}{R_1}$, где $w_{\text{п1}}$ - скорость

пара на входе в канал в относительном движении; R - текущий радиус канала, γ - текущий угол поворота потока.

Пример графического представления результатов расчета траектории представлен на рис.10.5. Траектория 1 отображает выпадение капли на бандаж рабочего колеса, траектории 2 и 3 - различные варианты движения жидкостного элемента по корытцу лопатки. На рисунке показаны случаи для капель диаметром 5 мк, влетающих в канал на различных расстояниях по высоте лопатки при заданном числе оборотов колеса. Траектории 4 и 5 отвечают соответственно каплям диаметром 20 и 80 мк. Из рисунка видно, что крупные капли сепарируются значительно лучше мелких. Тестовые расчеты при заданных размерах канала и характеристиках вращения позволяют определить размер капель, которые будут отсепарированы из парового потока. Результаты сепарации в решающей степени зависят от соотношения начальной скорости влетающих в канал капель и угловой скорости вращения ротора. На рис.10.6 представлено сравнение траекторий капель диаметром 50 мк при начальных скоростях $w_{d0} = 10, 20, 30$ и 40 м/с и неизменном числе оборотов равном 3800 об/мин. Чем меньше скорость капли, тем сильнее ее перемещение в радиальном направлении. Рассматриваемая задача реализована в программе DROP_3D (см. приложение №6).

Представление о движении жидкой пленки можно получить, анализируя совокупность траекторий капель заданного диаметра, движущихся в рабочем канале.

Движение капель после схода жидкости с рабочей лопатки определяется путем решения дифференциальных уравнений:

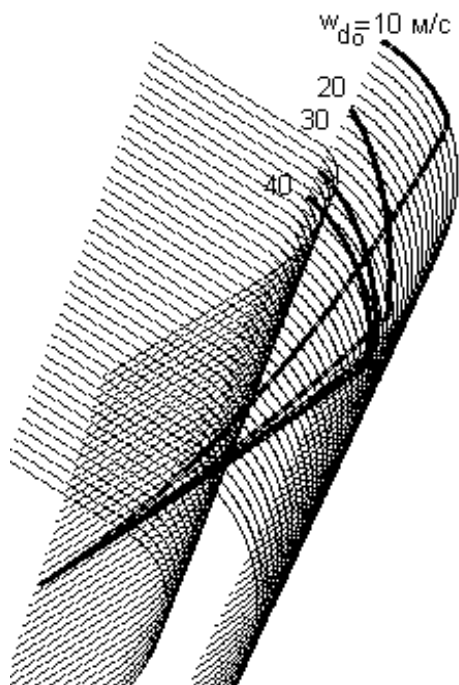


Рис. 10.6

виде [29]

$$\frac{dc_{Kr}}{dr} = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K D_K} (c_{\Pi r} - c_{Kr}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Kr}} + \frac{c_{Ku}^2}{c_{Kr} r},$$

$$\frac{dc_{Ku}}{d\varphi} = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi} r}{\rho_K D_K} (c_{\Pi u} - c_{Ku}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Ku}} - c_{Kr},$$

$$\frac{dc_{Kz}}{dz} = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_K D_K} (c_{\Pi z} - c_{Kz}) \frac{\Delta c_{\text{отн}}}{c_{Kz}}.$$

Отметим, что нанесение на поверхность лопаток вещества, которое не смачивается, позволило бы повысить точность расчетов на основе предлагаемой модели.

Созданная программа дает возможность изучить движение влаги в рабочем колесе при различных физических условиях.

В зарубежной технической литературе уравнение движения частицы в координатной форме часто записывается в

$$\ddot{r} = F_r + r(\dot{\theta} + \Omega)^2, \quad (10.8a)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{F_{\theta}}{r} - \frac{2\dot{r}}{r}(\dot{\theta} + \Omega), \quad (10.8b)$$

$$\ddot{z} = F_z, \quad (10.8c)$$

где Ω - угловая скорость вращения ротора, θ - угловая координата, $F_r = G(V_r - \dot{r})$, $F_{\theta} = G(V_{\theta} - r\dot{\theta})$, $F_z = G(V_z - \dot{z})$ - проекции аэродинамической силы, действующей на частицу, V_r, V_{θ}, V_z - составляющие относительной скорости

потока,
$$G = \frac{3}{4} \frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_K} \frac{c_x}{D_K} \left[(V_r - \dot{r})^2 + (V_{\theta} - r\dot{\theta})^2 + (V_z - \dot{z})^2 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Покажем, что уравнения (10.7) и (10.8) идентичны. Преобразуем уравнение

(10.8a): $\frac{dw_r}{d\tau} = F_r + r\dot{\theta}^2 + 2r\dot{\theta}\Omega + r\Omega^2$. Введем обозначения $\Omega = \omega$, $\theta = \varphi$, тогда

$$\frac{dw_r}{d\tau} = F_r + r\dot{\varphi}^2 + 2r\dot{\varphi}\omega + r\omega^2,$$

$$\text{но } r\dot{\varphi}^2 = \left(\frac{d\varphi}{d\tau}\right)^2 r = \frac{rd\varphi}{d\tau} \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{dl_\varphi}{d\tau} \frac{d\varphi}{d\tau} = w_\varphi \frac{d\varphi}{d\tau} = w_\varphi \frac{rd\varphi}{rd\tau} = \frac{w_\varphi^2}{r} = \frac{w_{\text{ку}}^2}{r},$$

$$2r \frac{d\varphi}{d\tau} \omega = 2w_{\text{ку}} \omega. \quad \text{Теперь уравнение (10.8a) примет вид}$$

$\frac{dw_{\text{кр}}}{d\tau} = \frac{w_{\text{ку}}^2}{r} + 2\omega w_{\text{ку}} + \omega^2 r + F_r$, что соответствует форме (10.7a). Рассмотрим уравнение (10.8b):

$$\frac{d^2\varphi}{d\tau^2} = \frac{F_\varphi}{r} - \frac{2w_r}{r} \frac{d\varphi}{d\tau} - \frac{2w_r \omega}{r} = \frac{F_\varphi}{r} - \frac{2w_r}{r} \frac{rd\varphi}{rd\tau} - \frac{2w_r \omega}{r} = \frac{F_\varphi}{r} - \frac{2w_{\text{кр}} w_{\text{ку}}}{r^2} - \frac{2w_{\text{кр}} \omega}{r}. \quad (\text{d})$$

Преобразуем левую часть (d):

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{d\varphi}{d\tau} \right) = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{rd\varphi}{rd\tau} \right) = \frac{d}{d\tau} \left(\frac{w_{\text{ку}}}{r} \right) = \left(r \frac{dw_{\text{ку}}}{d\tau} - \frac{dr}{d\tau} w_{\text{ку}} \right) \frac{1}{r^2} = \frac{1}{r} \frac{dw_{\text{ку}}}{d\tau} - \frac{w_{\text{кр}} w_{\text{ку}}}{r^2}. \quad (\text{e})$$

Подставим (e) в (d)

$$\frac{1}{r} \frac{dw_{\text{ку}}}{d\tau} - \frac{w_{\text{кр}} w_{\text{ку}}}{r^2} = \frac{F_\varphi}{r} - \frac{2w_{\text{кр}} w_{\text{ку}}}{r^2} - \frac{2w_{\text{кр}} \omega}{r}.$$

Умножив левую и правую часть последнего уравнения на r , получим

$$\frac{dw_{\text{ку}}}{d\tau} = - \left(\frac{w_{\text{кр}} w_{\text{ку}}}{r} + 2\omega w_{\text{кр}} \right) + F_\varphi,$$

что соответствует уравнению (10.7b) при $\omega = \text{const}$. Таким образом, идентичность уравнений доказана.

Раздел III. Пространственный поток – основные положения

В данном разделе получены в векторном виде основные уравнения сохранения при движении многофазных сред, необходимые для решения пространственных задач. Излагая этот материал, мы не ставили перед собой задачу рассмотрения всех аспектов проблемы пространственного гетерогенного потока, которые достаточно подробно разработаны в объемных фундаментальных научных трудах [9,10]. Наша цель заключалась в другом – показать, как на основе интегрального подхода получить основные уравнения сохранения для двухфазных потоков.

11. Уравнения сплошности

Получим уравнение сплошности для “ i ” компоненты гетерогенной среды. Выделим в бесконечной изотропной среде неподвижный объем V в пространстве заполненном движущейся смесью (см. рис.11.1). Изменение парциальной, или приведенной плотности $\rho_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G_i}{\Delta V}$ в фиксированном

объеме в единицу времени $\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V \rho_i dV = \int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} dV$ (в силу неизменности во

времени массы i компоненты $dG_i = \rho_i dV$) возможно за счет потока этого вещества через поверхность F , ограничивающую объем V , то есть: $-\int_F \vec{w}_i \cdot \vec{n} \rho_i dF$, здесь знак “-” обусловлен тем, что вектор \vec{w}_i имеет направление, противоположное направлению единичного вектора \vec{n} элементарной площадки dF .

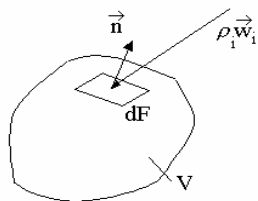


Рис.11.1

Кроме того, в этом объеме имеет место массообмен между компонентами: $\int_V \sum_{j=1}^n J_{ji} dV$, где

J_{ji} - поток массы от “ j ” к “ i ” компоненте, отнесенный к единице объема, кг/(м³с).

Таким образом,

$$\int_V \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} dV = -\int_F \vec{w}_i \cdot \vec{n} \rho_i dF + \int_V \sum_{j=1}^n J_{ji} dV. \quad (11.1)$$

По теореме Остроградского-Гаусса поток вектора через поверхность F равен дивергенции от этого вектора, взятой по объему, ограниченному этой поверхностью

$$\int_F \vec{w}_i \cdot \vec{n} \rho_i dF = \int_V \text{div}(\rho_i \vec{w}_i) dV. \quad (11.2)$$

С учетом (11.2) перепишем (11.1) в виде

$$\int_V \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_i \vec{w}_i) \right) dV = \int_V \sum_{j=1}^n J_{ji} dV. \quad (11.3)$$

В дифференциальной форме уравнение (11.3) будет иметь вид

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \text{div}(\rho_i \vec{w}_i) = \sum_{j=1}^n J_{ji}. \quad (11.4)$$

Истинная плотность “ i ” компоненты $\rho_i^0 = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \frac{\Delta G_i}{\Delta V_i}$, а парциальная -

$\rho_i = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G_i}{\Delta V}$. Отсюда найдем связь между истинной и парциальной плотностью

$$\rho_i = \rho_i^0 \cdot \alpha_i, \quad (11.5)$$

где $\alpha_i = V_i/V$ - объемная доля “ i ” компоненты.

Перепишем (11.4) с учетом (11.5):

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_i \rho_i^0) + \text{div}(\alpha_i \rho_i^0 \vec{w}_i) = \sum_{j=1}^n J_{ji}. \quad (11.6)$$

Так, например, для паровой составляющей парок капельного потока можно написать при $T_K > T_{\Pi}$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0) + \text{div}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 \vec{w}_{\Pi}) = \left(\sum_m (\pi D_k^2 J_{k-\Pi})_m \right) n_V. \quad (11.7)$$

где n_V - концентрация капель в единице объема, 1/м³.

В декартовой и цилиндрической системах координат соответственно будем иметь

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0) + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi z}) = J_{\text{к-п}}. \quad (11.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi \alpha \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 w_{\Pi z}) = J_{\text{к-п}}. \quad (11.9)$$

Для стационарного парового потока, несущего испаряющиеся капли одного размера и движущегося в плоском прямоугольном канале при $w_{\Pi r} = 0$ в полярной системе координат уравнение сплошности примет вид

$$\frac{d}{d\varphi}(\alpha_{\Pi} \rho_{\Pi}^0 \bar{w}_{\Pi \alpha \varphi}) = \pi D_{\text{к}}^2 j_{\text{к-п}} n_{\nu} r. \quad (11.10)$$

12. Уравнение движения

Вывод уравнения движения возможен двумя способами. В одном случае за основу берется закон Ньютона-Даламбера, согласно которому сила инерции уравновешивается внешними силами, приложенными к рассматриваемому элементу. В другом - рассматривается изменение количества движения в фиксированном объеме за счет потоков количества движения и сил, приложенных к объему.

Остановимся на последнем варианте, но покажем, что полученное выражение можно привести к первому случаю.

При нестационарном режиме течения локальное изменение количества движения i -й компоненты в фиксированном объеме в единицу времени $\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V (\rho_i \bar{w}_i) dV$ обусловлено потоком количества движения i -ой составляющей

$\left(- \int_F (\rho_i \bar{w} \cdot \bar{n}) \bar{w}_i dF \right)$ через поверхность рассматриваемого контрольного объема,

потоками количества движения, вносимыми источниками масс $\int_V \sum_{j=1}^m J_{ji} \bar{w}_j dV$,

действием внешних поверхностных сил $\int_F \bar{p}_n dF + \int_V \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{конп}ji} dV$ и объемных

гравитационных сил $\int_V \rho_i \bar{g} dV$, то есть

$$\int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i \bar{w}_i) dV = - \int_F (\rho_i \bar{w}_i \cdot \bar{n}) \bar{w}_i dF + \int_F \bar{p}_n dF + \int_V \rho_i \bar{g} dV + \int_V \sum_{j=1}^m (\bar{F}_{\text{конп}ji} + J_{ji} \bar{w}_j) dV. \quad (12.1)$$

Элементарную поверхностную силу $\bar{p}_n dF$, действующую на площадку dF с ортом \bar{n} , можно представить как сумму сил

$$\bar{p}_n dF = \bar{p}_x dF_x + \bar{p}_y dF_y + \bar{p}_z dF_z = \bar{p}_x dF \cos(n, x) + \bar{p}_y dF \cos(n, y) + \bar{p}_z dF \cos(n, z), \quad (12.2)$$

где dF_x, dF_y, dF_z - элементарные площадки, перпендикулярные осям x, y и z .

Вводя обозначения $n_x = \cos(n, x), n_y = \cos(n, y), n_z = \cos(n, z)$, вместо (12.2) можно написать

$$\bar{p}_n = n_x \bar{p}_x + n_y \bar{p}_y + n_z \bar{p}_z. \quad (12.3)$$

Применяя теорему Остроградского-Гаусса, перейдем от поверхностных интегралов к объемным [22]

$$\int_F (\rho_i \vec{w}_i \cdot \vec{n}) \vec{w}_i dF = \int_V \nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i dV,$$

$$\int_F \vec{p}_n dF = \int_F (n_x \vec{p}_x + n_y \vec{p}_y + n_z \vec{p}_z) dF = \int_V \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right) dV,$$

так как $\int_F \vec{a} \cos(n, x) dF = \int_V \frac{\partial \vec{a}}{\partial x} dV$ и т. д., где \vec{a} - произвольный вектор.

Теперь (12.1) можно представить в форме уравнения в “напряжениях”:

$$\int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i \vec{w}_i) dV + \int_V \nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i dV = \int_V \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right) dV +$$

$$+ \int_V \sum_{j=1}^m (\vec{F}_{\text{соп } ji} + J_{ji} \vec{w}_j + \rho_i \vec{g}) dV. \quad (12.4)$$

В дифференциальной форме будем иметь

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i \vec{w}_i) + \nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i = \frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} +$$

$$+ \sum_{j=1}^m (\vec{F}_{\text{соп } ji} + J_{ji} \vec{w}_j) + \rho_i \vec{g}. \quad (12.5)$$

Преобразуем левую часть уравнения (12.5). Величина $\rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i$ является тензором, дивергенцию этого тензора можно разложить на два слагаемых [26]:

$$\nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i \vec{w}_i = \rho_i \vec{w}_i \cdot \nabla \vec{w}_i + \vec{w}_i (\nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i),$$

так как $\text{Div } \vec{a} \vec{b} = (\vec{a} \cdot \nabla) \vec{b} + \vec{b} \text{div } \vec{a}$ есть диадное умножение векторов [22].

Кроме того, $\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i \vec{w}_i) = \vec{w}_i \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \rho_i \frac{\partial \vec{w}_i}{\partial \tau}$. Подставив полученные выражения в

левую часть (12.5), с учетом уравнения сплошности $\frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} = \sum_{j=1}^m J_{ji} - \nabla \cdot \rho_i \vec{w}_i$

получим

$$\rho_i \left(\frac{\partial \vec{w}_i}{\partial \tau} + (\vec{w}_i \cdot \nabla) \vec{w}_i \right) + \vec{w}_i \sum_{j=1}^m J_{ji} = \rho_i \frac{D \vec{w}_i}{D \tau} + \vec{w}_i \sum_{j=1}^m J_{ji}.$$

Теперь уравнение движения примет вид, отвечающий закону Ньютона-Даламбера

$$\rho_i \frac{D \vec{w}_i}{D \tau} = \frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} + \sum_{j=1}^m (\vec{F}_{\text{соп } ji} - J_{ji} (\vec{w}_i - \vec{w}_j)) + \rho_i \vec{g}. \quad (12.6)$$

Вектор $\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z}$ можно рассматривать как предел [22]

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F \vec{p}_n dF = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{1}{V} \int_F \vec{n} \Pi dF = \text{div } \Pi, \text{ то есть } \frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} = \text{div } \Pi = \nabla \Pi,$$

где Π - тензор напряжений, характеризующий напряженность среды в данной точке. Отметим, что $\text{div } \Pi$ (расхождение тензора Π) представляет собой плотность распределения главного вектора поверхностных сил в данной точке. Следовательно, (12.6) можно представить в виде

$$\rho_i \frac{D\bar{w}_i}{D\tau} = \nabla \Pi_i + \sum_{j=1}^m (\bar{F}_{\text{comp } ji} - J_{ji} (\bar{w}_i - \bar{w}_j)) + \rho_i \bar{g}. \quad (12.7)$$

Проектируя силу давления $\bar{p}_n = n_x \bar{p}_x + n_y \bar{p}_y + n_z \bar{p}_z$ на оси декартовой системы координат, получим

$$\begin{cases} p_{nx} = n_x p_{xx} + n_y p_{xy} + n_z p_{xz} \\ p_{ny} = n_x p_{yx} + n_y p_{yy} + n_z p_{yz} \\ p_{nz} = n_x p_{zx} + n_y p_{zy} + n_z p_{zz}. \end{cases} \quad (12.8)$$

Проекции векторов напряжений $\bar{p}_x, \bar{p}_y, \bar{p}_z$ на нормали к соответствующим элементарным площадкам называются нормальными напряжениями p_{xx}, p_{yy}, p_{zz} (см. рис.12.1).

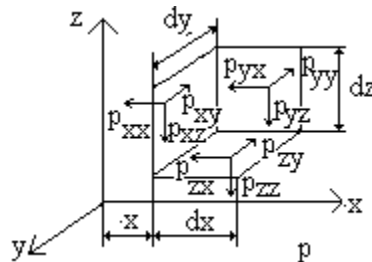


Рис. 12.1

Напряжения, лежащие в плоскостях площадок являются касательными напряжениями p_{yx}, p_{zx} и т.д. Часто в технической литературе они обозначаются буквой τ (τ_{yx}, τ_{zx} ...).

Совокупность девяти проекций напряжения (см. 12.8) образуют тензор напряжений второго ранга

$$\Pi = \begin{pmatrix} p_{xx} & p_{xy} & p_{xz} \\ p_{yx} & p_{yy} & p_{yz} \\ p_{zx} & p_{zy} & p_{zz} \end{pmatrix}. \quad (12.9)$$

Напомним, что скаляр - это тензор нулевого ранга, вектор - тензор первого ранга, тензор второго ранга имеет два подстрочных индекса.

Можно показать, что $p_{xy} = p_{yx}, p_{xz} = p_{zx}, p_{yz} = p_{zy}$. Действительно, рассматривая, например, равновесие моментов относительно оси z , можно написать $(p_{xy} dz dy) dx - (p_{yx} dz dx) dy = 0$, отсюда $p_{xy} = p_{yx}$ и т.д.

Так как напряжения являются функциями положения, то для оси x на передней грани на координате x (см. рис. 12.3) компонента силы равна

$$-(p_{xx} + p_{xy} + p_{xz}) dy dz, \quad (a)$$

а на координате $x+dx$ будем иметь

$$\left[p_{xx} + \frac{\partial}{\partial x} (p_{xx}) dx \right] dy dz + \left[p_{xy} + \frac{\partial}{\partial x} (p_{xy}) dx \right] dy dz + \left[p_{xz} + \frac{\partial}{\partial x} (p_{xz}) dx \right] dy dz. \quad (b)$$

Складывая (a) и (b), получим

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} (p_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (p_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (p_{xz}) \right] dx dy dz. \quad (c)$$

Для осей y и z будем иметь соответственно

$$\left[\frac{\partial}{\partial y}(p_{yy}) + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yz}) \right] dx dy dz, \quad (d)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial z}(p_{zx}) + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zy}) + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zz}) \right] dx dy dz. \quad (e)$$

Сложим (c), (d) и (e) и сгруппируем слагаемые с учетом направлений КОМПОНЕНТ ПО Осям

$$\left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x}(p_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zx}) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x}(p_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zy}) \right] + \left[\frac{\partial}{\partial x}(p_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(p_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(p_{zz}) \right] \right\} dx dy dz.$$

То есть $\text{div} \Pi$ мы выразили через его проекции

$$\text{div} \Pi = (\text{div} \Pi)_x + (\text{div} \Pi)_y + (\text{div} \Pi)_z.$$

Еще раз отметим, что $\text{div} \Pi$ - вектор, который определяет величину и направление суммарной поверхностной силы в данной точке, так как

$$\int_V \text{div} \Pi dV = \oint_F \vec{n} \Pi dF \Rightarrow \text{div} \Pi = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\oint_F \vec{n} \Pi dF}{V}.$$

В курсе гидрогазодинамики однородной среды показывается [22], что скорость материальной точки M (см. рис.12.2) складывается из поступательной скорости $\vec{w}(\vec{r})$, вращательной скорости $\vec{w}_{\text{вр}} = \vec{\omega} \times d\vec{r}$ вокруг мгновенной оси и скорости деформации $\vec{w}_{\text{деф}} = \dot{S} d\vec{r}$, то есть

$$\vec{w}_1 = \vec{w}(\vec{r}) + \vec{\omega} \times d\vec{r} + \dot{S} d\vec{r}, \quad (12.10)$$

где $\dot{S} = \begin{pmatrix} \dot{S}_{xx} & \dot{S}_{xy} & \dot{S}_{xz} \\ \dot{S}_{yx} & \dot{S}_{yy} & \dot{S}_{yz} \\ \dot{S}_{zx} & \dot{S}_{zy} & \dot{S}_{zz} \end{pmatrix}$ - тензор скоростей деформаций. Выражение (12.10)

является аналитической записью первой теоремы Гельмгольца. Тензор симметричен, следовательно,

$$\dot{S}_{yx} = \dot{S}_{xy}, \dot{S}_{zx} = \dot{S}_{xz}, \dot{S}_{zy} = \dot{S}_{yz}.$$

Чтобы пояснить физическую суть тензора скоростей деформации, рассмотрим одну из компонент его деформационной составляющей, например, \dot{S}_{xy} .

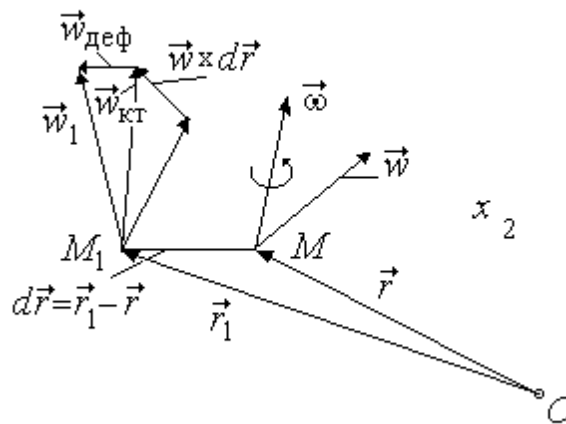


Рис. 12.2

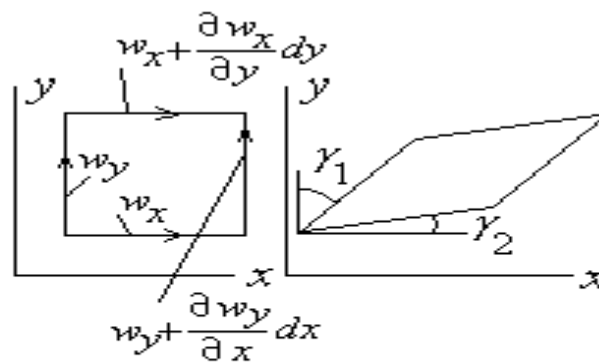


Рис.12.3

Будем считать, что в момент τ частица имела форму квадрата со скоростями $w_x, w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} dy, w_y, w_y + \frac{\partial w_y}{\partial x} dx$. Так как скорости на гранях частицы неодинаковы, то через единицу времени произойдет ее деформация, при этом $\operatorname{tg} \gamma_1 \approx \gamma_1 = \frac{\partial w_x}{\partial y}$, а $\gamma_2 = \frac{\partial w_y}{\partial x}$; тогда можно написать, что

$$\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) = \dot{\epsilon}_{xy}.$$

Таким образом, деформационные составляющие будут иметь вид

$$\begin{cases} \dot{S}_{xx} = \frac{\partial w_x}{\partial x}, & \dot{S}_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial y} \right), & \dot{S}_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_z}{\partial x} + \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) \\ \dot{S}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right), & \dot{S}_{yy} = \frac{\partial w_y}{\partial y}, & \dot{S}_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \\ \dot{S}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right), & \dot{S}_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right), & \dot{S}_{zz} = \frac{\partial w_z}{\partial z}. \end{cases} \quad (12.11)$$

Вернемся снова к скорости частицы в точке M_1 . Ее можно записать так

$$\vec{w}_1 = \vec{w}(\vec{r}) + \frac{\partial \vec{w}}{\partial x} dx + \frac{\partial \vec{w}}{\partial y} dy + \frac{\partial \vec{w}}{\partial z} dz. \quad (12.12)$$

В проекциях на оси координат будем иметь

$$\begin{cases} w_{x1} = w_x + \frac{\partial w_x}{\partial x} dx + \frac{\partial w_x}{\partial y} dy + \frac{\partial w_x}{\partial z} dz, \\ w_{y1} = w_y + \frac{\partial w_y}{\partial x} dx + \frac{\partial w_y}{\partial y} dy + \frac{\partial w_y}{\partial z} dz, \\ w_{z1} = w_z + \frac{\partial w_z}{\partial x} dx + \frac{\partial w_z}{\partial y} dy + \frac{\partial w_z}{\partial z} dz. \end{cases} \quad (12.13)$$

Формально например, $\frac{\partial w_x}{\partial y}$ можно записать следующим образом

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_x}{\partial y} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial x} \right), \text{ а} \\ \frac{\partial w_x}{\partial z} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial x} \right). \end{aligned}$$

Аналогично записываются производные от проекций скоростей по другим осям.

Итак, мы видим, что появились новые слагаемые

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) &= \omega_x, & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) &= -\omega_z, \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) &= \omega_y, \end{aligned}$$

которые характеризуют вращательную скорость движущейся частицы жидкости.

Теперь вместо (12.13) можно написать:

$$\begin{cases} w_{x1} = w_x + \omega_y dz - \omega_z dy + \dot{S}_{xx} dx + \dot{S}_{xy} dy + \dot{S}_{xz} dz, \\ w_{y1} = w_y + \omega_z dx - \omega_x dz + \dot{S}_{yx} dx + \dot{S}_{yy} dy + \dot{S}_{yz} dz, \\ w_{z1} = w_z + \omega_x dy - \omega_y dx + \dot{S}_{zx} dx + \dot{S}_{zy} dy + \dot{S}_{zz} dz. \end{cases} \quad (12.14)$$

Напомним, что $rot \vec{w} = \nabla \times \vec{w} = \left(\frac{\partial w_z}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial w_x}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial w_y}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) \vec{k}$,

$$\begin{aligned}(\operatorname{rot} \vec{w})_x &= \frac{\partial w_z}{\partial y} - \frac{\partial w_y}{\partial z} = 2\omega_x, \\(\operatorname{rot} \vec{w})_y &= \frac{\partial w_x}{\partial z} - \frac{\partial w_z}{\partial x} = 2\omega_y, \\(\operatorname{rot} \vec{w})_z &= \frac{\partial w_y}{\partial x} - \frac{\partial w_x}{\partial y} = 2\omega_z,\end{aligned}$$

то есть $\vec{\omega} = \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{w}$.

Таким образом, (12.13) можно также представить в виде

$$\vec{w}_1 = \vec{w}(\vec{r}) + \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{w} \times d\vec{r} + \dot{S} d\vec{r} = \vec{w}(\vec{r}) + \frac{1}{2} \operatorname{rot} \vec{w} \times d\vec{r} + \operatorname{def} \vec{w} d\vec{r}, \quad (12.15)$$

где $\dot{S} = \operatorname{def} \vec{w}$ - деформация поля вектора $\vec{w}(\vec{r})$.

Закон линейной связи между тензором напряжений Π и тензором скоростей деформации \dot{S} в изотропной среде называется обобщенным законом Ньютона, а жидкости, подчиняющиеся этому закону, - ньютоновскими:

$$\Pi = a\dot{S} + bI, \quad (12.16)$$

где I - единичный тензор или тензорная единица, которая переводит скаляр в тензор;

$$I = \begin{cases} 0, & \text{если } i \neq j \\ 1, & \text{если } i = j, (i, j = 1, 2, 3); \end{cases}$$

a и b - скаляры, причем так как связь линейная, то a не зависит от Π и \dot{S} .

В курсе механики жидкости и газа [22] показано, что $a=2\mu$, а $b = -p - \left(\frac{2}{3}\mu - \mu'\right) \operatorname{div} \vec{w}$, тогда (12.16) можно представить в виде

$$\Pi = 2\mu\dot{S} + \left[-p - \left(\frac{2}{3}\mu - \mu'\right) \operatorname{div} \vec{w}\right] I, \quad (12.17)$$

где μ' - коэффициент объемной вязкости, или второй коэффициент вязкости.

Вторая вязкость проявляет себя в быстро протекающих процессах (взрывы, скачки уплотнения, акустические задачи), поэтому в дальнейшем будем полагать $\mu' = 0$. С учетом сказанного

$$\Pi = 2\mu\dot{S} - \left(p + \frac{2}{3}\mu \operatorname{div} \vec{w}\right) I. \quad (12.18)$$

Отметим, что в невязкой несжимаемой среде ($\mu = 0$, $\operatorname{div} \vec{w} = 0$)

$$\Pi = -\frac{1}{3}(p_{11} + p_{22} + p_{33}), \text{ где } p_{11} = p_{22} = p_{33}.$$

Средний тензор напряжений в i -ой фазе можно разложить на тензор напряжений в "чистой" i -ой фазе Π_i^0 и тензоры Π_{ji} , зависящие от межфазного взаимодействия вещества i -ой фазы с веществом j -ой фазы на границе раздела фаз [22]

$$\Pi_i = \alpha_i \Pi_i^0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j \Pi_{ji}, \quad (12.19)$$

где $\alpha_i = \frac{\dot{V}_i}{\dot{V}_i + \dot{V}_j} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_i \dot{G}_j}{\rho_j \dot{G}_i}}$ и $\alpha_j = 1 - \alpha_i$ - объемные доли фаз.

Теперь уравнение движения (12.7) примет вид:

$$\rho_i \frac{D\bar{w}_i}{D\tau} = \nabla \left(\alpha_i \Pi_i^0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j \Pi_{ji} \right) + \sum_{j=1}^m \left(\bar{F}_{\text{сопр.}ji} - J_{ji} (\bar{w}_i - \bar{w}_j) \right) + \rho_i \bar{g}. \quad (12.20)$$

Если считать $\nabla \left(\sum_{j=1}^m \alpha_j \Pi_{ji} \right) = \sum_{j=1}^m \left(\bar{F}_{\text{сопр.}ji} \right)$, тогда вместо (12.20) можно написать

$$\rho_i \frac{D\bar{w}_i}{D\tau} = \nabla (\alpha_i \Pi_i^0) + \sum_{j=1}^m \left(\bar{F}_{\text{сопр.}ji} - J_{ji} (\bar{w}_i - \bar{w}_j) \right) + \rho_i \bar{g}. \quad (12.21)$$

Рассматривая движение i -ой компоненты в относительной системе координат, следует абсолютное ускорение выразить через его составляющие. Тогда вместо (12.21) будем иметь

$$\begin{aligned} \rho_i \left(\frac{D\bar{w}_{i\text{отн}}}{D\tau} + 2(\bar{\omega} \times \bar{w}_{i\text{отн}}) + \bar{\omega} \times (\bar{\omega} \times \bar{r}) + \dot{\bar{\omega}} \times \bar{r} \right) = \nabla (\alpha_i \Pi_i^0) + \\ + \sum_{j=1}^m \left(\bar{F}_{\text{сопр.}ji.\text{отн.}} - J_{ji} (\bar{w}_i - \bar{w}_j) \right)_{\text{отн.}} + \rho_i \bar{g}. \end{aligned} \quad (12.22)$$

13. Уравнение энергии

Локальное изменение полной энтальпии массы i -ой компоненты в фиксированном объеме в единицу времени $\frac{\partial}{\partial \tau} \int_V (\rho_i i_i^*) dV$ обусловлено

потоками теплоты и энтальпии i -ой компоненты через его поверхность $\int_F ((-\lambda_i \nabla T) \cdot \bar{n} + (\rho_i \bar{w}_i) \cdot \bar{n}) i_i^* dF$, мощностью поверхностных

$\int_F \bar{p}_n \cdot \bar{w}_i dF + \int_V \bar{w}_i \cdot \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{сопр.}ji} dV$ и внешних массовых сил $\int_V \bar{F}_i \cdot \bar{w}_i dV$, а также

потоками энтальпии в процессе массопереноса от j -ой к i -ой компоненте

$\int_V \sum_{j=1}^m J_{ji} i_j^* dV$. Исходя из вышеизложенного, можно написать

$$\begin{aligned} \int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i i_i^*) dV = \int_F ((-\lambda_i \nabla T) \cdot \bar{n} + (\rho_i \bar{w}_i) \cdot \bar{n}) i_i^* dF + \int_F \bar{p}_n \cdot \bar{w}_i dF + \int_V \bar{w}_i \cdot \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{сопр.}ji} dV + \\ + \int_V \bar{F}_i \cdot \bar{w}_i dV + \int_V \sum_{j=1}^m J_{ji} i_j^* dV. \end{aligned} \quad (13.1)$$

Используя формулу Остроградского-Гаусса, перейдем от поверхностных к объемным интегралам:

$$\int_F ((-\lambda_i \nabla T) \cdot \bar{n} + (\rho_i \bar{w}_i) \cdot \bar{n}) i_i^* dF = \int_V \text{div}(-\lambda_i \nabla T + \rho_i \bar{w}_i i_i^*) dV,$$

$$\int_F \bar{p}_n \cdot \bar{w}_i dF = \int_V \left(\frac{\partial(\bar{p}_x \cdot \bar{w}_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{p}_y \cdot \bar{w}_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{p}_z \cdot \bar{w}_i)}{\partial z} \right) dV =$$

$$= \int_V \left(\frac{\partial \bar{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{p}_z}{\partial z} \right) \cdot \bar{w}_i dV + \int_V \left(\bar{p}_x \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial x} + \bar{p}_y \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial y} + \bar{p}_z \frac{\partial \bar{w}_i}{\partial z} \right) dV = \int_V (\operatorname{div} \Pi_i \cdot \bar{w}_i + N_{\text{дисс}}) dV,$$

где $N_{\text{дисс}}$ - мощность диссипации, которая характеризует часть механической мощности, переходящей в теплоту.

Теперь уравнение энергии можно записать в виде

$$\int_V \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i i_i^*) dV + \int_V \operatorname{div}(\rho_i \bar{w}_i i_i^*) dV = \int_V \operatorname{div}(\lambda_i \nabla T_i) dV + \int_V (\operatorname{div} \Pi_i \cdot \bar{w}_i + N_{\text{дисс}}) dV + \int_V \bar{w}_i \cdot \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{сопр.} j i} dV + \int_V \bar{F}_i \cdot \bar{w}_i dV + \int_V \sum_{j=1}^m J_{ji} i_j^* dV. \quad (13.2)$$

Выполним преобразование левой части уравнения с учетом уравнения

сплошности $\operatorname{div}(\rho_i \bar{w}_i) = \sum_{j=1}^m J_{ji} - \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau}$ и формулы $\operatorname{div}(\varphi \bar{a}) = \varphi \operatorname{div} \bar{a} + \bar{a} \operatorname{grad} \varphi$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho_i i_i^*) + \operatorname{div}(\rho_i \bar{w}_i i_i^*) &= i_i^* \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \rho_i \frac{\partial i_i^*}{\partial \tau} + i_i^* \operatorname{div}(\rho_i \bar{w}_i) + \bar{w}_i \rho_i \operatorname{grad} i_i^* = \\ &= i_i^* \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + \rho_i \frac{\partial i_i^*}{\partial \tau} - i_i^* \frac{\partial \rho_i}{\partial \tau} + i_i^* \sum_{j=1}^m J_{ji} + \bar{w}_i \rho_i \operatorname{grad} i_i^* = \rho_i \left(\frac{\partial i_i^*}{\partial \tau} + (\bar{w}_i \cdot \nabla) i_i^* \right) + \\ &+ i_i^* \sum_{j=1}^m J_{ji} = \rho_i \frac{D i_i^*}{D \tau} + i_i^* \sum_{j=1}^m J_{ji}. \end{aligned}$$

Теперь уравнение энергии для i -ой компоненты в дифференциальной форме примет вид

$$\rho_i \frac{D i_i^*}{D \tau} = \operatorname{div}(\lambda_i \nabla T_i) + \operatorname{div} \Pi_i \cdot \bar{w}_i + N_{\text{дисс}} + \bar{w}_i \cdot \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{сопр.} j i} + \bar{F}_i \cdot \bar{w}_i + \sum_{j=1}^m J_{ji} (i_j^* - i_i^*). \quad (13.3)$$

Возможна и другая форма записи

$$\rho_i \frac{D i_i^*}{D \tau} = \operatorname{div}(\lambda_i \nabla T_i) + \operatorname{div}(\Pi_i \cdot \bar{w}_i) + \bar{w}_i \cdot \sum_{j=1}^m \bar{F}_{\text{сопр.} j i} + \bar{F}_i \cdot \bar{w}_i + \sum_{j=1}^m J_{ji} (i_j^* - i_i^*). \quad (13.4)$$

Следуя [56], рассмотрим более подробно вопрос о диссипации энергии. При движении вязкой жидкости некоторая часть механической энергии переходит в тепловую. Это явление называется диссипацией энергии. Найдем связь между работой массовых $L_V = \int_V \rho \bar{g} \cdot \bar{w} dV d\tau$ и поверхностных

$L_p = \int_S \bar{p}_n \cdot \bar{w} dS d\tau$ сил и энергией диссипации. Для работы поверхностных сил

можно написать:

$$\begin{aligned}
L_p &= \int_F \vec{p}_n \cdot \vec{w}_i dF d\tau = \int_V \left(\frac{\partial(\vec{p}_x \cdot \vec{w}_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\vec{p}_y \cdot \vec{w}_i)}{\partial y} + \frac{\partial(\vec{p}_z \cdot \vec{w}_i)}{\partial z} \right) dV d\tau = \\
&= \int_V \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right) \cdot \vec{w}_i dV d\tau + \int_V \left(\vec{p}_x \frac{\partial \vec{w}_i}{\partial x} + \vec{p}_y \frac{\partial \vec{w}_i}{\partial y} + \vec{p}_z \frac{\partial \vec{w}_i}{\partial z} \right) dV d\tau = \\
&= \int_V (\operatorname{div} \Pi_i \cdot \vec{w}_i + N_{\text{дисс}}) dV d\tau.
\end{aligned}$$

Тогда суммарная работа запишется в виде

$$L_V + L_p = \int_V (\rho_i \vec{g} \cdot \vec{w}_i + \operatorname{div} \Pi_i \cdot \vec{w}_i + N_{\text{дисс}}) dV d\tau. \quad (\text{a})$$

Для чистой фазы в поле гравитационных сил уравнение движения имеет вид

$$\rho_i \vec{a}_i = \rho_i \vec{g} + \operatorname{div} \Pi_i, \quad \text{где } \vec{a}_i = d\vec{w}_i / d\tau. \quad (\text{b})$$

Умножив (b) на \vec{w}_i и подставив в (a), получим

$$L = L_V + L_p = \int_V (\rho_i \vec{a}_i \cdot \vec{w}_i + N_{\text{дисс}}) dV d\tau.$$

Продифференцируем уравнение кинетической энергии газа $K = \int_V \frac{\rho_i w_i^2}{2} dV$.

$$dK = \int_V \rho_i d\left(\frac{w_i^2}{2}\right) dV = \int_V \rho_i \vec{w}_i \cdot d\vec{w}_i dV = \int_V \rho_i \vec{w}_i \cdot \vec{a}_i dV d\tau,$$

следовательно, $L = dK + \int_V N_{\text{дисс}} dV d\tau$ или $N = \frac{dK}{d\tau} + \int_V N_{\text{дисс}} dV$, то есть мощность,

производимая массовыми и поверхностными силами, только частично идет на увеличение потока кинетической энергии газа.

13а. Движение газокпельного потока в адиабатическом канале

В качестве примера рассмотрим стационарное движение закрученного газокпельного потока в адиабатическом сопле Лаваля.

Используя полученные уравнения сохранения, запишем их в координатной форме.

Уравнение сплошности несущего потока с учетом переменной массы в цилиндрической системе координат запишем в виде:

$$\frac{d\rho}{d\tau} + \rho \operatorname{div} \vec{w} = j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_v, \quad (13.5)$$

где $\frac{d\rho}{d\tau} = \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \vec{w} \operatorname{grad} \rho$; $\operatorname{grad} \rho = \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} + \frac{\partial \rho}{\partial x}$;

ρ – плотность парогазовой смеси; $\operatorname{div} \vec{w} = \frac{1}{r} \frac{\partial(r w_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_x}{\partial x}$;

$D_{\text{к}}$ – диаметр капли; $j_{\text{к-п}}$ – плотность потока пара от испаряющейся капли;

$n_v = \frac{\dot{n}}{w_{\text{к}} F}$ – объемная концентрация капель в потоке; $\dot{n} = \frac{6 \dot{G}_{\text{к}}}{\pi D_{\text{к}}^3 \rho_{\text{к}}}$ – поток капель.

Считая течение стационарным, перепишем (13.5)

$$w_r \frac{\partial \rho}{\partial r} + w_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \varphi} + w_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r w_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial (w_x)}{\partial x} \right) = j_{\kappa-\Pi} \pi D_\kappa^2 n_v \quad (13.6)$$

Уравнение движения газового потока с учетом наличия капель будет иметь вид:

$$\rho \left(w_r \frac{\partial w_x}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial w_x}{\partial \varphi} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\mu + \mu_{\text{тб}}) \frac{\partial w_x}{\partial r} \right) - F_{\text{сопр.к.х}} - (w_x - w_{\text{к.х}}) n_v j_{\kappa-\Pi} \pi D_\kappa^2 \quad (13.7)$$

где $F_{\text{сопр.к.х}} = c_x n_v \rho (w_x - w_{\text{к.х}}) |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}|_x \frac{\pi D_\kappa^2}{8}$ - проекция силы сопротивления капельного потока на ось x .

$$\rho \left(w_r \frac{\partial w_r}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial w_r}{\partial \varphi} + w_x \frac{\partial w_r}{\partial x} - \frac{w_\varphi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} - F_{\text{сопр.к.р}} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\mu + \mu_{\text{тб}}) \frac{\partial w_r}{\partial r} \right) - (w_r - w_{\text{к.р}}) n_v \pi D_\kappa^2$$

$$\rho \left(w_r \frac{\partial w_\varphi}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial w_\varphi}{\partial \varphi} + w_x \frac{\partial w_\varphi}{\partial x} + \frac{w_r w_\varphi}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} - F_{\text{сопр.к.}\varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left((\mu + \mu_{\text{тб}}) \frac{\partial w_\varphi}{r \partial \varphi} \right) - (w_\varphi - w_{\text{к.}\varphi}) n_v \pi D_\kappa^2$$

В приближении пограничного слоя, когда $w_r \ll w_x$, а $x \gg r$ производные от радиальной скорости w_r равны нулю.

Уравнение энергии представим в виде

$$\rho \left(w_x \frac{\partial i^*}{\partial x} + w_r \frac{\partial i^*}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial i^*}{\partial \varphi} \right) = \vec{w} \cdot \text{grad } p + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r(\lambda + \lambda_{\text{тб}}) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left((\lambda + \lambda_{\text{тб}}) \frac{\partial T}{r \partial \varphi} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left((\lambda + \lambda_{\text{тб}}) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \vec{F}_{\text{сопр.к}} \cdot \vec{w} + \alpha n_v \pi D_\kappa^2 (T_\kappa - T) + j_{\kappa-\Pi} n_v \pi D_\kappa^2 (i_\kappa^* - i^*),$$

$$\text{где } \text{grad } p = \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (13.8)$$

Для капли можно написать:

$$G_\kappa \vec{w}_\kappa \frac{d\vec{w}_\kappa}{dx} = c_x \rho (\vec{w} - \vec{w}_\kappa) |\vec{w} - \vec{w}_\kappa| \frac{\pi D_\kappa^2}{8}, \quad (13.9)$$

где $G_\kappa = \frac{\pi D_\kappa^3}{6} \rho_\kappa$ - масса капли; $c_x = 24/\text{Re}_\kappa + 4,4/\text{Re}_\kappa^{0,5} + 0,32$ или $c_x = \frac{24}{\text{Re}_\kappa}$ ($0 \leq \text{Re}_\kappa \leq 1$),

$$c_x = \frac{24}{\text{Re}_\kappa^{0,667}} \quad (1 \leq \text{Re}_\kappa \leq 390), \quad c_x = 0,45 \quad (\text{Re}_\kappa > 390), \quad \text{Re}_\kappa = \frac{\Delta w_{\text{отн}} D_\kappa \rho}{\mu}.$$

В координатной форме будем иметь:

$$G_\kappa \left(\frac{dw_{\text{Kr}}}{d\tau} - \frac{w_{\text{K}\varphi}^2}{r} \right) = c_x \frac{\pi D_\kappa^2}{8} \rho (w_r - w_{\text{Kr}}) \Delta w_{\text{отн}},$$

$$G_\kappa \left(\frac{dw_{\text{K}\varphi}}{d\tau} + \frac{w_{\text{K}\varphi} w_{\text{Kr}}}{r} \right) = c_x \frac{\pi D_\kappa^2}{8} \rho (w_\varphi - w_{\text{K}\varphi}) \Delta w_{\text{отн}},$$

$$G_\kappa \frac{dw_{\text{Kx}}}{d\tau} = c_x \frac{\pi D_\kappa^2}{8} \rho (w_x - w_{\text{Kx}}) \Delta w_{\text{отн}},$$

где $\Delta w_{\text{отн}} = \sqrt{(w_r - w_{\text{Kr}})^2 + (w_\varphi - w_{\text{K}\varphi})^2 + (w_x - w_{\text{Kx}})^2}$ - относительная скорость.

С учетом уравнения линии тока $\frac{dr}{w_{Kr}} = \frac{rd\varphi}{w_{K\varphi}} = \frac{dz}{w_{Kx}}$ преобразуем уравнения

движения к виду:

$$\begin{aligned}\frac{dw_{Kr}}{dr} &= \frac{3}{4}c_x \frac{\rho}{\rho_K D_K} (w_r - w_{Kr}) \frac{\Delta w_{отн}}{w_{Kr}} + \frac{w_{K\varphi}^2}{w_{Kr} r}, \\ \frac{dw_{K\varphi}}{d\varphi} &= \frac{3}{4}c_x \frac{\rho r}{\rho_K D_K} (w_\varphi - w_{K\varphi}) \frac{\Delta w_{отн}}{w_{K\varphi}} - w_{Kr}, \\ \frac{dw_{Kx}}{dx} &= \frac{3}{4}c_x \frac{\rho}{\rho_K D_K} (c_x - c_{Kx}) \frac{\Delta w_{отн}}{w_{K\varphi}}.\end{aligned}$$

Записывая уравнения в виде производных по φ , получим:

$$\begin{aligned}\frac{dw_{Kr}}{d\varphi} &= w_{K\varphi} - \frac{3}{4}c_x \frac{\rho r}{\rho_K D_K} \frac{\Delta w_{отн} w_{Kr}}{w_{K\varphi}}, \\ \frac{dw_{K\varphi}}{d\varphi} &= \frac{3}{4}c_x \frac{\rho r}{\rho_K D_K} \left(\frac{w_{\Pi\varphi}}{w_{K\varphi}} - 1 \right) \Delta w_{отн} - w_{Kr}, \\ \frac{dw_{Kx}}{d\varphi} &= \frac{3}{4}c_x \frac{\rho r}{\rho_K D_K} \left(\frac{w_{\Pi x}}{w_{Kx}} - 1 \right) \frac{\Delta w_{отн} w_{Kx}}{w_{K\varphi}}.\end{aligned}$$

Уравнение теплового баланса для испаряющейся капли имеет вид:

$$G_K \bar{w}_K \frac{di_K}{dx} = -\alpha \pi D_K^2 (T_K - T) + \tilde{r} \bar{w}_K \frac{dG_K}{dx}, \quad (13.10)$$

где $\tilde{r} = 2453 - 1,36t - 6 \cdot 10^{-3} t^2$, ($t = 100 \dots 180$ C) - удельная теплота парообразования;

$$\alpha = (2 + 0,6 \text{Pr}^{0,33} \text{Re}_K^{0,5}) \frac{\lambda}{D_K}; \quad \text{Pr} = \frac{\tilde{\mu} c_p}{\lambda}; \quad \text{Re}_K = \frac{|\bar{w} - \bar{w}_K| D_K \rho}{\tilde{\mu}};$$

$$\frac{dG_K}{dx} = \frac{j_{K-\Pi} \pi D_K^2}{w_K} = \frac{\beta \pi D_K^2}{w_K} (\rho_\Pi(T_K) - \rho_\Pi(T)); \quad j_{K-\Pi} = \beta (\rho_\Pi(T_K) - \rho_\Pi(T));$$

$$\beta = (2 + 0,6 \text{Sc}^{0,33} \text{Re}_K^{0,5}) \frac{\tilde{D}}{D_K} - \text{коэффициент массопереноса}; \quad \text{Sc} = \frac{\tilde{\mu}}{\rho \tilde{D}};$$

$$\tilde{D} = \tilde{D}_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \left(\frac{p_0}{p} \right) - \text{коэффициент диффузии}; \quad \rho_n - \text{плотность водяного пара.}$$

$$\frac{d\dot{G}_\Pi}{dx} = \pi D_K^2 j_{K-\Pi} n_v F_C = \frac{6\dot{G}_K j_{K-\Pi}}{D_K \rho_K w_K}, \quad \frac{dD_K}{dx} = -\frac{2j_{K-\Pi}}{\rho_K w_K}.$$

$$\dot{G} = \dot{G}_{\Gamma 0} + \dot{G}_\Pi, \quad \dot{G}_{\text{СМ}} = \dot{G}_{\Pi 0} + \dot{G}_{K 0} + \dot{G}_{\Gamma 0} = \text{const}, \quad d\dot{G}_\Pi = -d\dot{G}_K, \quad \mu = \dot{G} \mu_\Pi \mu_\Gamma / (\dot{G}_\Pi \mu_\Gamma + \dot{G}_\Gamma \mu_\Pi),$$

$$p_\Pi = \dot{G}_\Pi \mu p / (\dot{G} \mu_\Pi) - \text{парциальное давление пара в газопаровой смеси,}$$

$$R = R_0 (\dot{G}_{\Gamma 0} / \mu_\Gamma + \dot{G}_\Pi / \mu_\Pi) / \dot{G}, \quad c_p = (c_{p\Gamma} \dot{G}_\Gamma + c_{p\Pi} \dot{G}_\Pi) / \dot{G}, \quad p_{\Pi S} = f(T_K).$$

$$\rho = \frac{1+u}{\frac{T}{p} (R_\Gamma + u R_\Pi)}, \quad \text{где } u = \frac{\dot{G}_\Pi}{\dot{G}_\Gamma}; \quad T = \frac{c_{p\Gamma} T_\Gamma + c_{p\Pi} u T_K}{c_p}.$$

$$\tilde{\mu}_\Gamma = 17,2 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-6} t - 0,03 \cdot 10^{-9} t^2;$$

$$\lambda_\Gamma = 23,8 \cdot 10^{-3} + 8,4189 \cdot 10^{-5} t - 4,2908 \cdot 10^{-8} t^2;$$

$$i_{\Pi}'' = [2501 + 2,04t - 29 \cdot 10^{-4} t^2] \cdot 10^3;$$

$$\rho_K = 999,9 - 0,1475t - 2,695 \cdot 10^{-3} t^2;$$

$$\text{Re} = w D_c \rho / \tilde{\mu}; \quad c_f = 0,079 / \text{Re}^{0,25};$$

$$\tau_w = c_f \rho w^2 / 2; \quad F_c = \dot{G}_K / (w_K \rho_K) + \dot{G} / (w \rho); \quad D_c = \sqrt{4F_c / \pi};$$

$$\rho_{\Pi} = 6,7962 - 0,129299t + 6,7314 \cdot 10^{-4} t^2; \quad c_{pK} = 4331 - 3,09t + 1,98 \cdot 10^{-2} t^2;$$

$$p_s(T) = 10^6 \exp(82,86568 + 0,01028003T - 7821,541/T - 11,48776 \ln(T));$$

$$c_{p\Pi} = (2,719 - 0,0132t + 0,0000736t^2) 10^3; \quad c_{v\Pi} = c_{p\Pi} - 461,9.$$

$$i_{\Pi}' = (12,475 + 3,935t + 1,3125 \cdot 10^{-3} t^2) 10^3; \quad i_{\Pi}'' = (2461,1 + 2,636t - 4,88 \cdot 10^{-3} t^2) 10^3;$$

$$\tilde{r} = (2447,7 - 1,283t - 6,26 \cdot 10^{-3} t^2) 10^3; \quad \lambda_{\Pi}'' = (1,801 + 2,69 \cdot 10^{-3} t + 3,02 \cdot 10^{-5} t^2) 10^{-2};$$

$$\tilde{\mu}' = (613 - 4,227t + 9,22 \cdot 10^{-3} t^2) 10^{-6}; \quad \tilde{\mu}'' = (8,35 + 3,42 \cdot 10^{-2} t + 2 \cdot 10^{-5} t^2) 10^{-6};$$

$$\text{Pr}'' = 1,28 - 4,4e^{-3} t + 2,4 \cdot 10^{-5} t^2; \quad Ts(p) = \frac{4842,8222}{(24,5089 - \ln(p))};$$

$$\text{Для давлений } p = (0,1 \dots 1) \cdot 10^5 \text{ Па: } Ts(p) = \frac{5085,1472}{(25,1592 - \ln(p))}.$$

При решении обратной задачи можно считать, что закон изменения статического давления вдоль продольной оси сопла подчиняется зависимости:

$$p = \frac{p_0}{\left(\frac{p_0}{p_{cp}} - 1\right) \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1}, \quad \text{тогда} \quad \frac{dp}{dx} = - \frac{2p_0(p_0/p_{cp} - 1)x}{l^2 \left[\left(\frac{p_0}{p_{cp}} - 1\right) \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 1\right]^2}.$$

При решении прямой задачи необходимо задать геометрию сопла.

Будем считать, что сопло Лавалья состоит из двух усеченных прямых конусов и цилиндрического горла. В этом случае геометрия сопла описывается уравнениями:

$$D_c = D_{c0} - (D_{c0} - D_{\min})x/z_{\text{кон}}, \quad \text{если } x \leq z_{\text{кон}};$$

$$D_c = D_{\min}, \quad \text{если } x \geq z_{\text{кон}} \text{ и } x \leq (z_{\text{кон}} + z_{\min});$$

$$D_c = D_{\min} + (D_{\text{срез}} - D_{\min}) \cdot (x - (z_{\text{кон}} + z_{\min}))/z_{\text{див}}, \quad \text{если } x > (z_{\text{кон}} + z_{\min}); \quad F_c = \pi D_c^2 / 4.$$

$$dF_c / dx = -\pi(D_{c0} - (D_{c0} - D_{\min}) \cdot x/z_{\text{кон}}) \cdot (D_{c0} - D_{\min}) / 2z_{\text{кон}}, \quad \text{если } x \leq z_{\text{кон}};$$

$$dF_c / dx = 0, \quad \text{если } x \geq z_{\text{кон}} \text{ и } x \leq (z_{\text{кон}} + z_{\min});$$

$$dF_c / dx = \pi(D_{\min} + (D_{\text{срез}} - D_{\min}) \cdot (x - (z_{\text{кон}} + z_{\min}))/z_{\text{див}}) \cdot (D_{\text{срез}} - D_{\min}) / (2z_{\text{див}}),$$

$$\text{если } x > (z_{\text{кон}} + z_{\min}).$$

Используя разложение искомых функций в ряд Тейлора (математический подход к решению задачи) можно записать уравнения (13.6)-(13.10) в конечно-разностном виде, получив систему алгебраических уравнений с погрешностью аппроксимации, которые можно решить при заданных граничных условиях, например, методом Гаусса-Зайделя.

Покажем, как в этом случае получают конечно-разностную аппроксимацию производных первого и второго порядка.

Разложим функцию $u(x,y)$ в ряд Тейлора разностью “вперед”

$$u(x_0 + \Delta x, y_0) = u(x_0, y_0) + \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_0 \Delta x + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^n u}{\partial x^n} \Big|_\xi \frac{(\Delta x)^n}{n!}, \quad (\text{a})$$

откуда получим $\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x_0, y_0} = \frac{u(x_0 + \Delta x, y_0) - u(x_0, y_0)}{\Delta x} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \frac{\Delta x}{2} - \dots$ или

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x), \text{ где } O(\Delta x) - \text{погрешность аппроксимации.}$$

Для разности “назад” можно написать:

$$u(x_0 - \Delta x, y_0) = u(x_0, y_0) - \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_0 \Delta x + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_0 \frac{(\Delta x)^2}{2!} - \dots \quad (\text{b})$$

Из (b) найдем $\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x)$. Вычитая (b) из (a), получим аппроксимацию первой производной центральными разностями

$$u(x_0 + \Delta x, y_0) - u(x_0 - \Delta x, y_0) = 2\Delta x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + O(\Delta x)^2 \text{ или } \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + O(\Delta x)^2.$$

Складывая (a) и (b), определим конечно-разностную аппроксимацию производной второго порядка

$$u(x_0 + \Delta x, y_0) + u(x_0 - \Delta x, y_0) - 2u(x_0, y_0) = 2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \frac{(\Delta x)^2}{2} + O(\Delta x)^2, \text{ откуда в общем}$$

$$\text{виде можно написать: } \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_{i,j} = \frac{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2.$$

Однако в такой постановке делается предположение, что при этом выполняются законы сохранения. Поэтому наибольшее распространение получил метод контрольного объема (МКО) [26], который является консервативным (в каждом КО выполняются законы сохранения). В этом случае уравнения записываются в дивергентном виде и интегральной форме.

Рассмотрим паро-капельный поток.

Выделим в цилиндрической системе координат элементарный объем и получим необходимые геометрические соотношения (см. рис.13.1). Площадь кольца $\Delta S_w = \Delta S_e = 2\pi r_p (r_n - r_s)$, где $r_p = (r_n + r_s)/2$ - радиус полюса. Объем кольца $\Delta V = \Delta S_w \Delta z$. Боковые поверхности цилиндров высотой Δz : $\Delta S_n = 2\pi r_n (z_e - z_w) = 2\pi r_n \Delta z$, $\Delta S_s = 2\pi r_s (z_e - z_w) = 2\pi r_s \Delta z$.

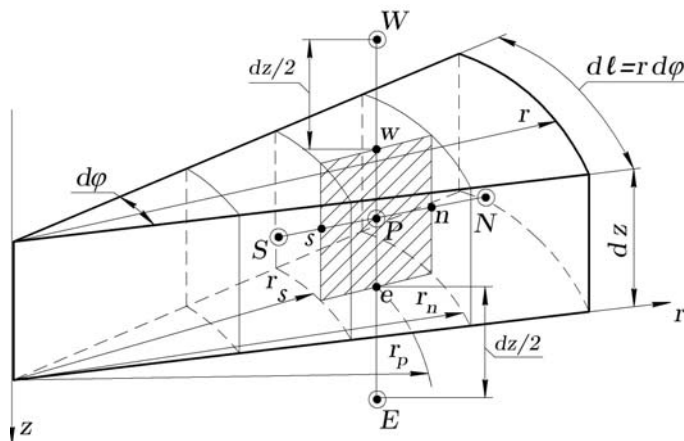


Рис. 13.1

Введем объемные доли пара α и капля β и найдем связь между α и диаметром капли $\alpha = \frac{\Delta V_{\text{п}}}{\Delta V} = \frac{\Delta V - \Delta V_{\text{к}}}{\Delta V} = 1 - \frac{n_{\text{к}} \pi D_{\text{к}}^3}{6 \Delta V} = 1 - \frac{1}{6} n_{\text{в}} \pi D_{\text{к}}^3$. Возьмем

производную от α по направлению l : $\frac{d\alpha}{dl} = -\frac{1}{2} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}} \frac{dD_{\text{к}}}{dl}$ (с), но

$dG_{\text{к}} = -j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 d\tau$ (д), где $G_{\text{к}} = \frac{\pi D_{\text{к}}^3}{6} \rho_{\text{к}}$. После дифференцирования (д) получим

$dD_{\text{к}} = -\frac{2j_{\text{к-п}}}{\rho_{\text{к}}} d\tau$. Так как $w_{\text{к}} = \frac{dl}{d\tau}$, то, подставляя $d\tau$ в предыдущую формулу,

найдем, что $\frac{dD_{\text{к}}}{dl} = -\frac{2j_{\text{к-п}}}{\rho_{\text{к}} w_{\text{к}}}$ (е). Теперь (с) с учетом (е) можно переписать в виде

$\frac{d\alpha}{dl} = \frac{j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}}}{\rho_{\text{к}} w_{\text{к}}}$ (к). Объемная доля капля $\beta = 1 - \alpha = \frac{1}{6} \pi D_{\text{к}}^3 n_{\text{в}}$.

Для потока пара, несущего испаряющиеся капли, уравнение сплошности запишем в виде:

$$\frac{\partial \rho_{\text{п}}}{\partial \tau} + \text{div}(\alpha \rho \vec{w})_{\text{п}} = j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}}, \quad (13.11)$$

где $\rho_{\text{п}} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} (\Delta G_{\text{п}} / \Delta V_{\text{п}})$ - истинная плотность пара.

При стационарном режиме течения в цилиндрической системе координат и интегральной форме применительно к КО (13.11) преобразуется к виду

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z)_{\text{п}} dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r \rho w_r)_{\text{п}} dV = \int_{\Delta V} j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}} dV. \quad (13.12)$$

Перепишем (13.12) в иной форме (см. рис.13.1)

$$\int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z)_{\text{п}} r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r \rho w_r)_{\text{п}} r dr dz d\varphi = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}} r dr dz d\varphi. \quad (13.13)$$

Для первого слагаемого в левой части уравнения после интегрирования

можно написать: $2\pi \left\{ [(\alpha \rho w_z)_e - (\alpha \rho w_z)_w] \int_{r_s}^{r_n} r dr \right\} = \pi \left\{ [(\alpha \rho w_z)_e - (\alpha \rho w_z)_w] (r_n^2 - r_s^2) \right\}$, для

второго получим: $2\pi \Delta z [(\alpha r \rho w_r)_n - (\alpha r \rho w_r)_s]$, используя очевидное равенство

$\int_l \frac{\partial f}{\partial l} dl = f$. В окончательном виде будем иметь:

$$\pi \left\{ [(\alpha \rho w_z)_e - (\alpha \rho w_z)_w] (r_n^2 - r_s^2) \right\} + 2\pi \Delta z [(\alpha r \rho w_r)_n - (\alpha r \rho w_r)_s] = \pi \Delta z \bar{J}_p (r_n^2 - r_s^2), \quad (13.14)$$

где $\bar{J}_p = j_{\text{к-п}} \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}}$; \bar{j} - осредненная плотность потока массы пара от испаряющейся капли в КО. Полученное уравнение относится к КО, находящемуся внутри потока и не прилежащему к границе, где задаются условия на входе, выходе и стенке канала.

Для КО, находящегося в центре канала после интегрирования (13.13) получим

$$\pi \left\{ [(\alpha \rho w_z)_e - (\alpha \rho w_z)_w] r_n^2 \right\} + 2\pi \Delta z [(\alpha r \rho w_r)_n] = \pi \Delta z \bar{J}_p r_n^2. \quad (13.14a)$$

Преобразуем (12.21) в дивергентную форму. Для стационарного режима уравнение (12.21) примет вид:

$$\alpha \rho_{\Pi} \bar{w}_{\Pi} \operatorname{div} \bar{w}_{\Pi} = \nabla(\alpha_{\Pi} \Pi_{\Pi}^0) + \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} - \dot{J}_{\text{к-п}}(\bar{w}_{\Pi} - \bar{w}_{\text{к}}) + \rho_{\Pi} g. \quad (13.15)$$

Умножим уравнение сплошности (13.11) на \bar{w}_{Π} при $\frac{\partial \rho_{\Pi}}{\partial \tau} = 0$ и сложим с (13.15)

$$\operatorname{Div}(\alpha \rho \bar{w} \bar{w})_{\Pi} = \alpha \rho_{\Pi} \bar{w}_{\Pi} \operatorname{div} \bar{w}_{\Pi} + \bar{w}_{\Pi} \operatorname{div}(\alpha \rho_{\Pi} \bar{w}_{\Pi}) = \nabla(\alpha_{\Pi} \Pi_{\Pi}^0) - \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} + \dot{J}_{\text{к-п}} \bar{w}_{\text{к}} + \alpha \rho_{\Pi} g, \quad (13.16)$$

где $\bar{F}_{\text{сопр.к-п}} = c_x \pi D_K^2 \rho_{\Pi} (\bar{w}_{\Pi} - \bar{w}_{\text{к}}) |w_{\Pi} - w_{\text{к}}| n_v / 8$; $\dot{J}_{\text{к-п}} = j_{\text{к-п}} \pi D_K^2 n_v$; $\Pi_{\Pi}^0 = \Pi_{ij} = -p \delta_{ij} + \tau_{ij}$;

$$\tau_{ij} = \mu_{\Pi} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]; \quad \tau_{zr} = \tau_{rz} = \mu_{\Pi} \left(\frac{\partial w_z}{\partial r} + \frac{\partial w_r}{\partial z} \right); \quad \tau_{zz} = \frac{2}{3} \mu_{\Pi} \left(2 \frac{\partial w_z}{\partial z} - \frac{\partial w_r}{\partial r} \right);$$

$\tau_{rr} = \frac{2}{3} \mu_{\Pi} \left(2 \frac{\partial w_r}{\partial r} - \frac{\partial w_z}{\partial z} \right)$. В общем случае при нестационарном режиме течения и интегральной форме можно написать:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial \tau} (\alpha \rho \bar{w})_{\Pi} dV + \int_{\Delta V} \operatorname{Div}(\alpha \rho \bar{w} \bar{w})_{\Pi} dV = \int_{\Delta V} \operatorname{div}(\alpha \Pi^0)_{\Pi} dV + \int_{\Delta V} \dot{J}_{\text{к-п}} \bar{w}_{\text{к}} dV - \int_{\Delta V} \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} dV + \int_{\Delta V} \alpha \rho_{\Pi} g dV$$

Запись уравнения движения в конечно-разностном виде представляет значительную сложность из-за необходимости написания большого числа алгебраических уравнений. Поэтому, получив представление о написании уравнения, упростим его сохранив основные воздействия на поток. Для стационарного режима получим:

$$\int_{\Delta V} \operatorname{Div}(\alpha \rho \bar{w} \bar{w})_{\Pi} dV = - \int_{\Delta V} \operatorname{grad}(\alpha p)_{\Pi} dV + \int_{\Delta V} \dot{J}_{\text{к-п}} \bar{w}_{\text{к}} dV - \int_{\Delta V} \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r \bar{\tau}_{\text{тр.}})_{\Pi} dV, \quad (13.17)$$

где $\bar{\tau}_{\text{тр.}z} = \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial r}$. Здесь считаем, что $\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\alpha \mu \frac{\partial w_z}{\partial z} \right)_{\Pi} dV \ll \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right)_{\Pi} dV$.

Проинтегрируем уравнение (13.17) в цилиндрической системе координат. Для левой части уравнения можно написать (подстрочный индекс “п”-пар опускаем):

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \operatorname{Div}(\alpha \rho \bar{w} \bar{w}) dV &= \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z^2) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha \rho r w_r^2) dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z^2) r dr dz d\varphi + \\ &+ \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha \rho r w_r^2) r dr dz d\varphi = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha \rho w_z^2)_e - (\alpha \rho w_z^2)_w] + \\ &+ 2\pi [(\alpha \rho w_r^2)_{r_n} r_n - (\alpha \rho w_r^2)_{r_s} r_s] (z_e - z_w). \end{aligned}$$

Для слагаемых в правой части уравнения соответственно будем иметь:

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \operatorname{grad}(\alpha p) dV &= \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha p) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r p) dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha p) r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r p) r dr dz d\varphi = \\ &= 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha p)_e - (\alpha p)_w] + 2\pi [(\alpha p)_{r_n} r_n - (\alpha p)_{r_s} r_s] (z_e - z_w), \\ \int_{\Delta V} \dot{J}_{\text{к-п}} \bar{w}_{\text{к}} dV &= (\dot{J}_{\text{к-п}} w_{\text{к}}) \Delta V = \dot{j}_{\text{к-п}} \pi D_K^2 n_v w_{\text{к}} \Delta V, \end{aligned}$$

$$\int_{\Delta V} \bar{F}_{\text{сопк-п}} dV = \int_{\Delta V} (F_{\text{сопк-п}})_z dV = ((c_x \pi D_k^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}})_z |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}|_z n_v / 8)_e - (c_x \pi D_k^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}})_z |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}|_z n_v / 8)_w) \Delta V$$

(здесь считаем, что $\int_{\Delta V} (F_{\text{сопк-п}})_z dV \gg \int_{\Delta V} (F_{\text{сопк-п}})_r dV$), $\int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha r \bar{t}_{\text{тр}}) dV =$

$$= \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) dV = 2\pi \Delta z \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) dr = 2\pi \Delta z \left[(\alpha r \mu)_n \left(\frac{w_N - w_P}{r_N - r_P} \right)_z - (\alpha r \mu)_s \left(\frac{w_P - w_S}{r_P - r_S} \right)_z \right] =$$

$$= \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_n w_{zN} + \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) [(\alpha r \mu)_n + (\alpha r \mu)_s] w_{zP} + \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_s w_{zS}.$$

Обозначим

$$FKD = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha \rho w_z^2)_e - (\alpha \rho w_z^2)_w] + 2\pi [(\alpha \rho w_r^2)_n r_n - (\alpha \rho w_r^2)_s r_s] (z_e - z_w),$$

$$GRP = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha p)_e - (\alpha p)_w] + 2\pi [(\alpha p)_n r_n - (\alpha p)_s r_s] (z_e - z_w),$$

$$\bar{J}_{\text{к-п}} = \bar{j}_{\text{к-п}} \pi D_k^2 n_v w_{\text{кз}} \Delta V,$$

$$F_{\text{к-п}} = ((c_x \pi D_k^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}})_z |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}|_z n_v / 8)_e - (c_x \pi D_k^2 \rho_{\text{п}} (w_{\text{п}} - w_{\text{к}})_z |w_{\text{п}} - w_{\text{к}}|_z n_v / 8)_w) \Delta V,$$

$$F_{\text{тр}} = \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_n w_{zN} + \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) [(\alpha r \mu)_n + (\alpha r \mu)_s] w_{zP} + \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_s w_{zS},$$

$$E = \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_n, \quad H = \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) [(\alpha r \mu)_n + (\alpha r \mu)_s], \quad K = \left(\frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \right) (\alpha r \mu)_s.$$

Теперь уравнение движения примет вид:

$$FKD = -GRP + \bar{J}_{\text{к-п}} - F_{\text{к-п}} + E w_N - H w_{Pz} + K w_S,$$

из которого определим скорость парового потока для внутреннего КО

$$w_{Pz} = \frac{1}{H} (-FKD - GRP + \bar{J}_{\text{к-п}} - F_{\text{к-п}} + E w_N + K w_S).$$

Запишем уравнение энергии парового потока в дивергентном

$$\text{div}(\alpha \rho \bar{w} i)_{\text{п}} = (\alpha \rho \bar{w} \text{grad} i)_{\text{п}} + i_{\text{п}} \text{div}(\alpha \rho \bar{w})_{\text{п}} = \bar{w}_{\text{п}} \text{grad}(\alpha p)_{\text{п}} + \text{div} \left(\frac{\lambda \alpha}{c_p} \text{grad} i \right)_{\text{п}} + \bar{F}_{\text{сопк-п}} \bar{w}_{\text{п}} +$$

ВИДЕ:

$$+ \alpha_{\text{к-п}} n_v \pi D_k^2 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) + \bar{j}_{\text{к-п}} i_{\text{к}}^* + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{w} \alpha r \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} \right)_{\text{п}}$$

ИЛИ

$$\text{div}(\alpha \rho \bar{w} i)_{\text{п}} = \text{div}(\alpha p \bar{w})_{\text{п}} - (\alpha p)_{\text{п}} \text{div} \bar{w}_{\text{п}} + \text{div} \left(\frac{\lambda \alpha}{c_p} \text{grad} i \right)_{\text{п}} + \bar{F}_{\text{сопк-п}} \bar{w}_{\text{п}} +$$

$$+ \alpha_{\text{к-п}} n_v \pi D_k^2 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) + \bar{j}_{\text{к-п}} i_{\text{к}}^* + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{w} \alpha r \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} \right)_{\text{п}}, \quad (13.18)$$

так как $\text{div}(a\bar{b}) = a \text{div} \bar{b} + \bar{b} \text{grad} a$. Для однокомпонентного потока слагаемое $\alpha_{\text{к-п}} n_v \pi D_k^2 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) = 0$. Запишем (13.18) в интегральной форме

$$\int_{\Delta V} \operatorname{div}(\alpha \rho \bar{w} i)_n dV = \int_{\Delta V} \operatorname{div}(\alpha \rho \bar{w})_n dV - \int_{\Delta V} (\alpha \rho)_n \operatorname{div} \bar{w}_n dV + \int_{\Delta V} \operatorname{div} \left(\frac{\lambda \alpha}{c_p} \operatorname{grad} i \right)_n dV +$$

$$\int_{\Delta V} \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} \bar{w}_n dV + \int_{\Delta V} \alpha_{\text{к-п}} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_n) dV + \int_{\Delta V} j_{\text{к-п}} i_k^* dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\bar{w} \alpha r \mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} \right) dV. \quad (13.19)$$

Уравнение энергии парового потока (13.19) в цилиндрической системе координат примет вид:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z i) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha \rho r w_r i) dV = \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha w_z p) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha w_r r p) dV -$$

$$- \int_{\Delta V} \alpha \rho \frac{\partial w_z}{\partial z} dV - \int_{\Delta V} \frac{\alpha \rho_r}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r w_r) dV + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\alpha r \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial r} \right) dV +$$

$$+ \int_{\Delta V} (F_{\text{сопр.к-п}} w)_z dV + \int_{\Delta V} (F_{\text{сопр.к-п}} w)_r dV + \int_{\Delta V} \alpha_{\text{к-п}} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_n) dV + \int_{\Delta V} j_{\text{к-п}} i_k^* dV +$$

$$+ \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(w_z \alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) dV. \quad (13.20)$$

Проинтегрируем левую часть уравнения (13.20) в пределах КО, находящегося внутри потока

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z i) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha \rho r w_r i) dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha \rho w_z i) r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha \rho w_r i) r dr dz d\varphi =$$

$$= 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha \rho w_z i)_e - (\alpha \rho w_z i)_w] + 2\pi [(\alpha \rho w_r i)_n r_n - (\alpha \rho w_r i)_s r_s] (z_e - z_w).$$

Рассмотрим правую часть уравнения. Для двух первых слагаемых можно написать:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha w_z p) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha w_r r p) dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\alpha w_z p) r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\alpha w_r r p) r dr dz d\varphi =$$

$$= 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha w_z p)_e - (\alpha w_z p)_w] + 2\pi [(\alpha w_r p)_n r_n - (\alpha w_r p)_s r_s] (z_e - z_w).$$

Для третьего и четвертого слагаемых будем иметь:

$$- \int_{\Delta V} \alpha \rho \frac{\partial w_z}{\partial z} dV - \int_{\Delta V} \frac{\alpha \rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r w_r) dV =$$

$$= -2\pi \left(\frac{r_n^2 - r_s^2}{2} \right) \left[(\alpha \rho)_e \left(\frac{w_{zE} - w_{zP}}{\Delta z} \right)_e - (\alpha \rho)_w \left(\frac{w_{zP} - w_{zW}}{\Delta z} \right)_w \right] \Delta z -$$

$$- 2\pi \Delta z \left[(\alpha \rho)_n \left(\frac{w_{rN} r_N - w_{rP} r_P}{\Delta r} \right)_n r_n - (\alpha \rho)_s \left(\frac{w_{rP} r_P - w_{rS} r_S}{\Delta r} \right)_s r_s \right].$$

Чтобы понять суть интегрирования пятого слагаемого, проинтегрируем подинтегральную функцию по оси z в пределах Δz КО (см. рис.13.1).

$$\int_w^e \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right) dz = \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right)_e - \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right)_w = \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_e \left(\frac{i_E - i_P}{\Delta z} \right) - \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_w \left(\frac{i_P - i_W}{\Delta z} \right) =$$

$$= \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e i_E - \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_e + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_w \right] \frac{i_P}{\Delta z} + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w i_W, \left| \frac{\text{Вт}}{\text{М}^2} \right|.$$

Тогда для нашего случая будем иметь:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right) dV = 2\pi \frac{(r_n + r_s)(r_n - r_s)}{2} \left\{ \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e i_E - \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_e + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_w \right] \frac{i_P}{\Delta z} + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w i_W \right\},$$

где $\frac{2\pi(r_n + r_s)(r_n - r_s)}{2} = \Delta S_w = \Delta S_e$ - площадь элементарного кольца.

Из полученного уравнения видим, что значение удельной энтальпии в искомой ячейке i_P зависит как от физических свойств потока на гранях ячейки, так и значений удельной энтальпии в соседних узлах (i_W, i_E).

Для шестого слагаемого можно написать:

$$\int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \frac{\partial i}{\partial r} \right) dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \frac{\partial i}{\partial r} \right) r dr dz d\varphi = 2\pi \Delta z \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \frac{\partial i}{\partial r} \right) dr =$$

$$= 2\pi \Delta z \left[\left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \right)_n \left(\frac{i_N - i_P}{r_N - r_P} \right) - \left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \right)_s \left(\frac{i_P - i_S}{r_P - r_S} \right) \right] = \frac{2\pi \Delta z r_n}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n i_N -$$

$$- \frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \left(r_n \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n + r_s \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s \right) i_P + \frac{2\pi \Delta z r_s}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s i_S.$$

Складывая пятое и шестое слагаемые, получим:

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \frac{\partial i}{\partial z} \right) dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\alpha \lambda r}{c_p} \frac{\partial i}{\partial r} \right) dV = \Delta S \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e i_E + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w i_W \right] -$$

$$- \left\{ \Delta S \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w \right] + \frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \left(r_n \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n + r_s \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s \right) \right\} i_P + \frac{2\pi \Delta z r_n}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n i_N +$$

$$+ \frac{2\pi \Delta z r_s}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s i_S.$$

Считая, что $\int_{\Delta V} (F_{\text{сопр.к-п}})_z dV \gg \int_{\Delta V} (F_{\text{сопр.к-п}})_r dV$, можно написать:

$$\int_{\Delta V} \vec{F}_{\text{сопр.к-п}} \vec{w}_n dV = \int_{\Delta V} (F_{\text{сопр.к-п}})_z dV = ((c_x \pi D_k^2 \rho_n (w_n - w_k)_z |w_n - w_k|_z n_v w_{nz} / 8)_e -$$

$$- (c_x \pi D_k^2 \rho_n (w_n - w_k)_z |w_n - w_k|_z n_v w_{nz} / 8)_w) \Delta V.$$

Для потока теплоты от капель несущему потоку будем иметь:

$$\int_{\Delta V} \alpha_{к-п} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_п) dV = \bar{\alpha}_{к-п} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_п) \Delta V,$$

где $\bar{\alpha}_{к-п}$ - средний коэффициент теплоотдачи от капель к пару.

Для потока энтальпии пара от капель можно написать:

$$\int_{\Delta V} \bar{j}_{к-п} \bar{i}_k^* dV = \left(\bar{j}_{к-п} \bar{i}_k^* \right) \Delta V, \text{ где } \bar{j}_{к-п} = \bar{j}_{к-п} \pi D_k^2 n_v.$$

Для последнего слагаемого после интегрирования будем иметь:

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(w_z \alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) dV &= \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(w_z \alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) r dr dz d\varphi = 2\pi \Delta z \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial r} \left(w_z \alpha r \mu \frac{\partial w_z}{\partial r} \right) dr = \\ &= 2\pi \Delta z \left[(w_z \alpha r \mu)_n \left(\frac{w_N - w_P}{r_N - r_P} \right) - (w_z \alpha r \mu)_s \left(\frac{w_P - w_S}{r_P - r_S} \right) \right]. \end{aligned}$$

Для учета градиента касательных напряжений вдоль продольной оси z необходимо в уравнение энергии добавить слагаемое

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(w_z \alpha \mu \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) dV &= \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} \left(w_z \alpha \mu \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) r dr dz d\varphi = \\ &= \pi (r_n^2 - r_s^2) \left[(w_z \alpha \mu)_e \left(\frac{w_E - w_P}{z_E - z_P} \right)_z - (w_z \alpha \mu)_w \left(\frac{w_P - w_W}{z_P - z_W} \right)_z \right], \end{aligned}$$

вклад которого существенно меньше предыдущего.

Рассматривая течение внутри пограничного слоя, слагаемые $\partial p / \partial r$, $\partial w_r / \partial r$, $\partial \tau_z / \partial z$ можно положить равными нулю.

Введем обозначения для слагаемых в уравнении энергии.

$$FI = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha \rho w_z i)_e - (\alpha \rho w_z i)_w] + 2\pi [(\alpha \rho w_r i)_n r_n - (\alpha \rho w_r i)_s r_s] (z_e - z_w),$$

$$NP1 = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\alpha w_z p)_e - (\alpha w_z p)_w] + 2\pi [(\alpha w_r p)_n r_n - (\alpha w_r p)_s r_s] (z_e - z_w),$$

$$NP2 = -2\pi \left(\frac{r_n^2 - r_s^2}{2} \right) \left[(\alpha p_z)_e \left(\frac{w_{zE} - w_{zP}}{\Delta z} \right)_e - (\alpha p_z)_w \left(\frac{w_{zP} - w_{zW}}{\Delta z} \right)_w \right] \Delta z -$$

$$- 2\pi \Delta z \left[(\alpha p)_n \left(\frac{w_{rN} r_N - w_{rP} r_P}{\Delta r} \right)_n r_n - (\alpha p)_s \left(\frac{w_{rP} r_P - w_{rS} r_S}{\Delta r} \right)_s r_s \right].$$

Для пятого и шестого слагаемых

$$Ai_{(E-W)} = \Delta S \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e i_E + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w i_W \right],$$

$$Bi_P = \left\{ \Delta S \left[\left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_e + \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p \Delta z} \right)_w \right] + \frac{2\pi \Delta z}{\Delta r} \left[r_n \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n + r_s \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s \right] \right\} i_P;$$

$$Ci_N + Di_S = \frac{2\pi \Delta z r_n}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_n i_N + \frac{2\pi \Delta z r_s}{\Delta r} \left(\frac{\alpha \lambda}{c_p} \right)_s i_S.$$

Мощность сопротивления капельного потока, мощность теплового потока от капель, мощность потока энтальпии пара от испаряющихся капель и

мощность сил вязкостного трения обозначим соответственно через $NF_{к-п}$, $NQ_{к-п}$, $NI_{к-п}$ и $NF_{тр}$.

$$NF_{к-п} = ((c_x \pi D_k^2 \rho_n (w_{пн} - w_{кз}) |w_{пн} - w_{кз}|_z n_v w_{пз} / 8)_e - (c_x \pi D_k^2 \rho_n (w_{пн} - w_{кз}) |w_{пн} - w_{кз}|_z n_v w_{пз} / 8)_w) \Delta V,$$

$$NQ_{к-п} = \bar{\alpha}_{к-п} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_{пн}) \Delta V,$$

$$NI_{к-п} = (\bar{j}_{к-п} \bar{i}_k^*) \Delta V,$$

$$NF_{тр} = 2\pi \Delta z \left[(w_z \alpha r \mu)_n \left(\frac{w_N - w_P}{r_N - r_P} \right)_z - (w_z \alpha r \mu)_s \left(\frac{w_P - w_S}{r_P - r_S} \right)_z \right].$$

Теперь уравнение энергии примет вид:

$$FI = NP1 - NP2 + Ai_{(E-W)} - Bi_P + Ci_N + Di_S + NF_{к-п} + NQ_{к-п} + NI_{к-п} + NF_{тр}.$$

Откуда определим искомую энтальпию пара (парогазовой смеси) в КО, расположенном внутри потока

$$i_p = \frac{1}{B} (NP1 - (FI + NP2) + Ai_{(E-W)} + Ci_N + Di_S + NF_{к-п} + NQ_{к-п} + NI_{к-п} + NF_{тр}).$$

Рассмотрим уравнения для капельного потока.

Уравнение сплошности для внутреннего КО

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\beta w_z)_k dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r w_r)_k dV = - \frac{1}{\rho_k} \int_{\Delta V} j_{к-п} \pi D_k^2 n_v dV,$$

которое после интегрирования примет вид:

$$\pi \left\{ [(\beta w_z)_e - (\beta w_z)_w] (r_n^2 - r_s^2) \right\} + 2\pi \Delta z [(\beta r w_r)_n - (\beta r w_r)_s]_{к} = - \frac{1}{\rho_k} \pi \Delta z \bar{j}_p (r_n^2 - r_s^2).$$

Уравнение количества движения капельного потока

$$\int_{\Delta V} \text{Div}(\beta \bar{w} \bar{w})_k dV = \frac{1}{\rho_k} \left(- \int_{\Delta V} \text{grad}(\beta p) dV - \int_{\Delta V} j_{к-п} \bar{w}_k dV + \int_{\Delta V} \bar{F}_{\text{сопк-п}} dV \right),$$

где $\beta = 1 - \alpha = \frac{1}{6} \pi D_k^3 n_v$ - объемная доля капель в потоке.

Интегрируя левую часть уравнения, получим

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \text{Div}(\beta \bar{w} \bar{w})_k dV &= \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\beta w_z^2)_k dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r w_r^2)_k dV = \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\beta w_z^2)_k r dr dz d\varphi + \\ &+ \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r w_r^2)_k r dr dz d\varphi = 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\beta w_z^2)_e - (\beta w_z^2)_w]_{к} + \\ &+ 2\pi [(\beta w_r^2)_n r_n - (\beta w_r^2)_s r_s]_{к} (z_e - z_w). \end{aligned}$$

После интегрирования правой части уравнения будем иметь:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \text{grad}(\beta p) dV &= \frac{1}{\rho_k} \left(\int \frac{\partial}{\partial z} (\beta p) dV + \int \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r p) dV \right) = \\
&= \frac{1}{\rho_k} \left(\int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\beta p) r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r p) r dr dz d\varphi \right) = \\
&= \frac{1}{\rho_k} \left[2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\beta p)_e - (\beta p)_w] + 2\pi [(\beta p)_n r_n - (\beta p)_s r_s] (z_e - z_w) \right], \\
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \mathbf{j}_{k-\Pi} \bar{w}_k dV &= \frac{1}{\rho_k} \left(\bar{j}_{k-\Pi} w_{kz} \right) \Delta V = \frac{1}{\rho_k} \bar{j}_{k-\Pi} \pi D_k^2 n_v w_{kz} \Delta V, \\
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} dV &= \frac{1}{\rho_k} \int (F_{\text{сопр.к-п}})_z dV = \frac{1}{\rho_k} ((c_x \pi D_k^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_k)_z |w_{\Pi} - w_k|_z n_v / 8)_e - \\
&- (c_x \pi D_k^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_k)_z |w_{\Pi} - w_k|_z n_v / 8)_w) \Delta V.
\end{aligned}$$

Уравнение энергии

$$\int_{\Delta V} \text{div}(\beta \bar{w} i)_k dV = \frac{1}{\rho_k} \left(\int \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} \bar{w}_k dV - \int \mathbf{j}_{k-\Pi} i_k^* dV - \int \alpha_{k-\Pi} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_{\Pi}) dV \right).$$

Интегрируя левую часть уравнения, получим

$$\begin{aligned}
\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} (\beta w_z i)_k dV + \int_{\Delta V} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r w_r i)_k dV &= \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{\partial}{\partial z} (\beta w_z i)_k r dr dz d\varphi + \int_0^{2\pi} \int_{\Delta z} \int_{r_s}^{r_n} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\beta r w_r i)_k r dr dz d\varphi = \\
&= 2\pi \left[\frac{(r_s + r_n)}{2} (r_n - r_s) \right] [(\beta w_z i)_{k,e} - (\beta w_z i)_{k,w}] + 2\pi [(\beta w_r i)_{k,n} r_n - (\beta w_r i)_{k,s} r_s] (z_e - z_w).
\end{aligned}$$

Для правой части уравнения можно написать:

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \mathbf{j}_{k-\Pi} i_k^* dV &= \frac{1}{\rho_k} \left(\bar{j}_{k-\Pi} \bar{i}_k^* \right) \Delta V = \frac{1}{\rho_k} \bar{j}_{k-\Pi} \bar{i}_k^* \pi D_k^2 n_v w_{kz} \Delta V, \\
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \bar{F}_{\text{сопр.к-п}} \bar{w}_k dV &= \frac{1}{\rho_k} \int (F_{\text{сопр.к-п}})_z w_{kz} dV = \frac{1}{\rho_k} (((c_x \pi D_k^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_k)_z |w_{\Pi} - w_k|_z n_v / 8)_e - \\
&- (c_x \pi D_k^2 \rho_{\Pi} (w_{\Pi} - w_k)_z |w_{\Pi} - w_k|_z n_v / 8)_w)) w_{kz} \Delta V, \\
\frac{1}{\rho_k \Delta V} \int \alpha_{k-\Pi} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_{\Pi}) dV &= \frac{1}{\rho_k} \bar{\alpha}_{k-\Pi} n_v \pi D_k^2 (T_k - T_{\Pi}) \Delta V.
\end{aligned}$$

Вводя обозначения, как и для газового потока, получим алгебраические уравнения для численного решения. Далее необходимо составить уравнения для КО, прилежащих к входной, выходной частям канала и стенке при заданных граничных условиях. Так, например, на оси канала будем иметь:

$$w_{\Pi r} = w_{kr} = 0; \left(\frac{\partial w_{\Pi z}}{\partial r} \right)_{r=0} = \left(\frac{\partial w_{kz}}{\partial r} \right)_{r=0} = 0; \left(\frac{\partial T_{\Pi z}}{\partial r} \right)_{r=0} = \left(\frac{\partial T_{kz}}{\partial r} \right)_{r=0} = 0.$$

На стенке: $w_{\Pi r} = w_{kr} = 0; w_{\Pi z} = w_{kz} = 0; \left(\frac{\partial^2 w_{\Pi z}}{\partial r^2} \right)_{r=R_0} = 0; \left(\frac{\partial T_{\Pi z}}{\partial r} \right)_{r=R_0} = 0$ и т.д.

Решение задач подобного рода осуществляется методом прогонки в сочетании с итерационным методом Гаусса – Зейделя.

Раздел IV.

14. Экспериментальное исследование вскипающих и высоковлажных потоков

Использование вскипающих потоков в энергетических установках с целью получения технической работы ставит в первую очередь задачу повышения эффективности сопел, возможности их расчета, определения предельной степени преобразования теплоты горячей жидкости в кинетическую энергию направленного потока. Изучения поведения вскипающих и двухфазных потоков в элементах струйных аппаратов и гидропаровых турбин с целью совершенствования процессов.

На кафедре "Теоретические основы теплотехники" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета в течение многих лет проводятся работы по изучению процессов в адиабатных вскипающих потоках, которые позволяют вскрыть основные закономерности, имеющие место в таких потоках.

Исследования сопел Лаваля традиционной формы, работающих на горячей воде близкой к состоянию насыщения и низких начальных давлениях ($p_0^* = 0,4...0,8$ МПа) показывают, что эффективность таких сопел низка (коэффициент скорости, как правило, не превышает 0,7; см. рис. 14.1) из-за значительной термической и механической неравновесности потока, а расход воды намного больше расхода, подсчитанного по изоэнтروпийной модели

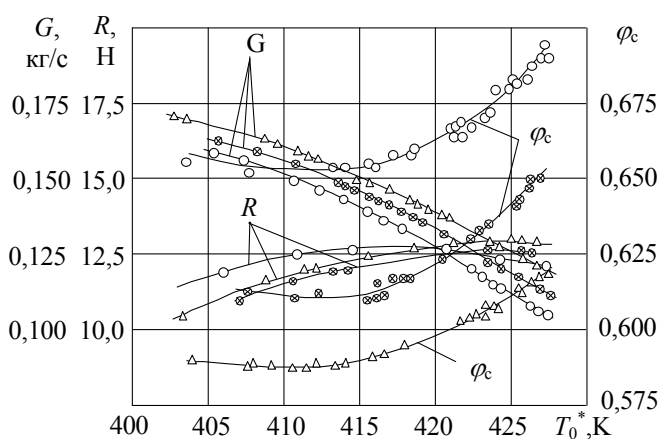


Рис. 14.1. Влияние начальной температуры воды на основные характеристики сопла Лаваля традиционной формы. $p_0^* = 0,6$ МПа.

○ - $d_{cp} = 10$ мм, ⊗ - 15 мм; △ - 20 мм.

термическую и механическую неравновесность потока [54].

Так, экспериментально обнаружено существование двух кризисов течения: первый определяет независимость статического давления в горле и расхода воды через сопло Лаваля от противодействия, второй – независимость давления на срезе сопла от противодействия, что определяет

Наши визуальные наблюдения показывают, что видимое вскипание воды происходит за минимальным сечением сопла и распространяется от стенки к ядру потока. В области "горла" поток имеет ярко выраженную неоднородность – вскипевший пристенный поток и метастабильное ядро жидкости. Взаимодействие между этими потоками в дальнейшем приводит к распаду центральной струи на крупные капли, что и порождает

предельный перепад энтальпии в сопле и максимальную кинетическую энергию на срезе сопла. Первый кризис обусловлен двухслойной структурой (пар–жидкость) потока в области горла, второй – капельно-паровой структурой. Так, для сопла Лавая, имеющего геометрические размеры (см. рис.14.4): $d_{\text{вх}}=30$ мм, $d_{\text{г}}=3$ мм, (сходящаяся часть сопла образована двумя сопряженными полусферами с радиусами 30 и 40 мм и цилиндрическим каналом длиной 2 мм, в котором просверлено отверстие диаметром 0,8 мм для замера статического давления в горле), $d_{\text{ср}}=9,8$ мм и $l_{\text{рс}}=125$ мм, где $l_{\text{рс}}$ – длина расширяющейся части сопла; $d_{\text{г}}$ – диаметр горла сопла при $p_0^*=0,6$ МПа и $T_0^*=423$ К получено: $p_{\text{г кр1}}=0,45$ МПа, $p_{\text{ср кр2}}=0,09$ МПа, $G_{\text{кр}}=0,13$ кг/с (см. рис.14.2). Рис.14.2 иллюстрирует влияние начальной температуры воды перед соплом на расход и статические давления в горле и на срезе сопла в зависимости от противодействия. Из рисунка видно, что критический расход и стабилизация давления в горле с ростом температуры наступает при меньшем противодействии.

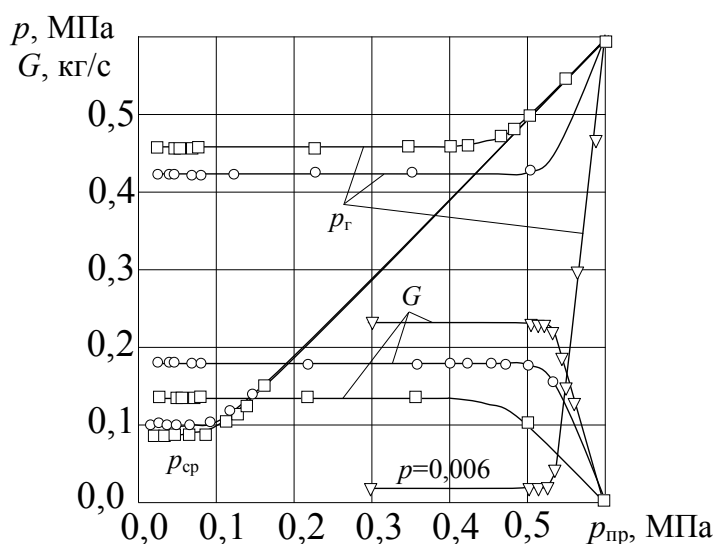


Рис.14.2 Влияние противодействия на характеристику сопла Лавая традиционной формы при различных температурах горячей воды на входе в сопло, $p_0^*=0,6$ МПа, \circ - $t_0^*=418$, \square 423 К, ∇ 287 К.

температуры t_0^* приводит к росту давления на срезе сопла, что обусловлено интенсивным парообразованием и выделением большого количества пара в области среза из-за значительного перегрева воды относительно текущего давления и повышенного расхода.

Критический расход горячей воды через сопла может быть определен по формуле, полученной В.А. Барилевичем и Г.А. Поповым

Повышение температуры приводит к росту давления в горле и уменьшению критического расхода, при этом стабилизация давления на срезе происходит при меньшем давлении, чем для менее нагретой воды. Так как кризисные явления в двухфазном потоке зависят от состояния паровой фазы и объемного паросодержания, то характер поведения кривых на рисунке может быть объяснен с этих позиций. Так, уменьшение

$$\dot{G} = \mu_{XB} A \left(\frac{c_{pж} \Delta t_H}{r} \right)^m \left(\frac{F_{cp}}{F_r} \right)^n F_r (2p_0^* \rho_{ж0})^{0.5}, \text{ где} \quad (14.1)$$

$p_0^* = 0,4 \dots 1,0$ МПа; $\Delta t_H = t_s(p_0^*) - t_0^*$; $F_{cp}/F_r = 11,1 \dots 44,4$; $r = f(t_0^*)$;
 $\mu_{XB} = 0,95 \dots 0,96$; F_r и F_{cp} - площади поперечного сечения горла и среза сопла;

при $\Delta t_H = 4 \dots 12$ С, $A = 0,860$, $m = 0,217$, $n = 0,140$;

при $\Delta t_H = 12 \dots 20$ С, $A = 1,700$, $m = 0,340$, $n = 0,051$.

Погрешность определения расхода по предлагаемой формуле составляет $\pm 5\%$. В логарифмической системе координат прямые $\frac{G_{ГБ}}{G_{XB}} = f\left(\frac{1}{K}\right)$,

где $K = \frac{r}{C_{pж} \Delta t_H}$, при $\frac{1}{K} = 0,025$ имеют излом ($\Delta t_H = 12^\circ$), который показывает

различие в процессах истечения горячей и относительно холодной (большая величина Δt_H) воды. Из формулы видно, что при недогреве воды до температуры насыщения $\Delta t_H \geq 12$ градусов влияние отношения F_{cp}/F_r на расход незначительно.

Влияние начальной температуры на расход воды через данные сопла показан на рис. 14.3. Как видно из хода кривых с ростом температуры происходит их расслоение в зависимости от диаметра среза. С уменьшением температуры до 287 К кривые 2, 3, и 4 стягиваются в точку с расходом 0,226...0,228 г/с. Расход воды через сходящееся сопло в этом случае составляет 0,210 г/с. Так как кривая сходящегося сопла пересекает кривые сопел Лавалья, то существует такая начальная температура, при которой геометрия сопла не влияет на расход.

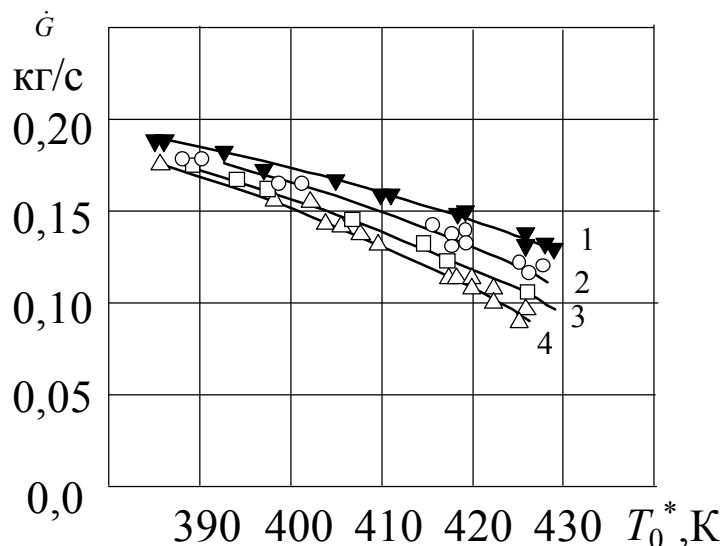


Рис.14.3. Расходные характеристики сопел ($p_0^* = 0,6$ МПа, $d_r = 3$ мм, $l_{pc} = 125$ мм): 1 – сходящееся сопло, 2 – сопло Лавалья, $d_{cp} = 20$ мм, 3 – сопло Лавалья, $d_{cp} = 15$ мм, 4 – сопло Лавалья, $d_{cp} = 10$ мм.

При незначительных углах раскрытия ($1,5^{\circ} \div 3^{\circ}$) расширяющейся части сопла Лавая расход горячей воды можно определить по формуле (получена В.А. Барилевичем):

$$\dot{G}_{ГВ} = \left[0,33 + \left(1 - \frac{T_0}{T_s(p_0)} \right)^{0,395} \right] \mu_{ХВ} F_{Г} (2p_0 \rho_{ХВ})^{0,5}. \quad (14.2)$$

Для этих сопел было обнаружено, что при приближении T_0 к $T_s(p_0)$ расход горячей воды стремится к своему предельному минимальному значению $\dot{G}_{ГВ} \approx 0,33 \dot{G}_{ХВ}$.

На рисунке 14.4 показано экспериментальное распределение статического давления вдоль сопла Лавая, работающего на горячей воде ($p_0^* = 0,6$ МПа, $T_0^* = 426$ К,

$$\dot{G}_{КР} = 0,1 \frac{кг}{с}, \quad p_{Г.КР} = 0,46 \text{ МПа},$$

$$p_{СР} = 0,1 \text{ МПа})$$

и расчетные значения температуры, скорости капель и пара. Из хода кривых видно, что в области горла, где в воде перегретой относительно температуры насыщения происходит спонтанное образование пузырьков имеет место значительный рост скорости потока из-за падения плотности. Большая разность температур между паром и каплями, приводящая к необратимому теплообмену между фазами, и наличие существенного скольжения между фазами (на срезе сопла $c_k/c_n = 0,7$) приводит к тому, что эффективность сопел Лавая традиционной формы, работающих на вскипающей воде, не может быть высокой ($\eta_c \leq 0,64$).

Изменение статического давления вдоль проточной части сопла Лавая в зависимости от противодействия представлено на рис. 14.5, здесь же показан ход кривой $p_{СР} = f(p_{нр})$ – кривая 7. Как видим, поток ‘следит’ за противодействием, что говорит о дозвуковом течении (кривые –

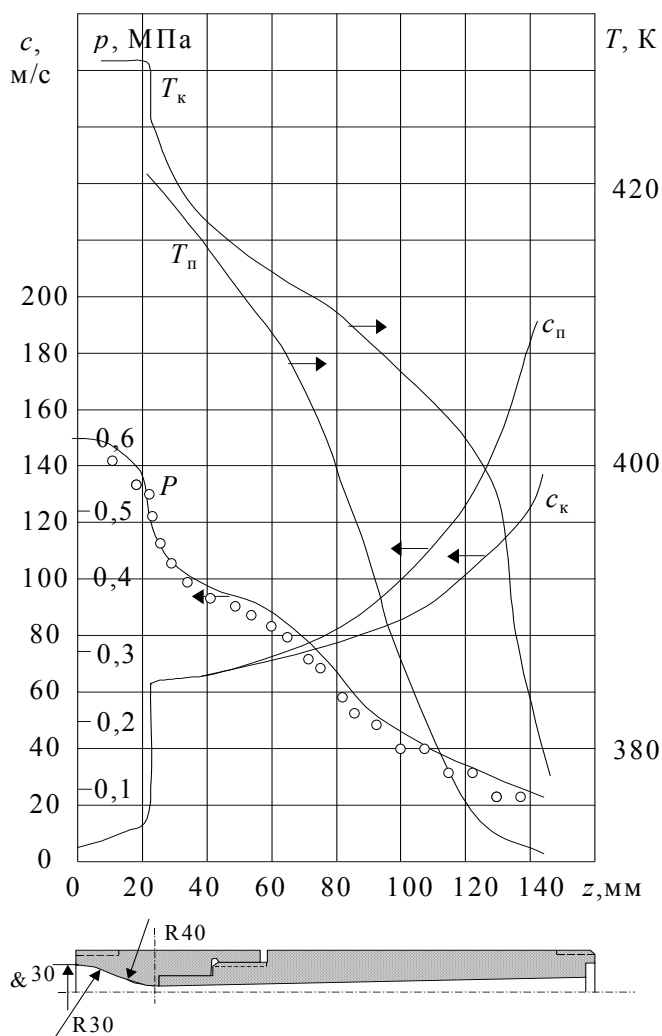


Рис.14.4. Изменение основных физических величин вдоль сопла Лавая, работающего на горячей воде.

1,2,3,4). При противодавлении 0,1 МПа (кривая 5) давление на выходе из сопла практически совпадает с противодавлением и создается впечатление, что сопло работает в расчетном режиме. Однако дальнейшее уменьшение

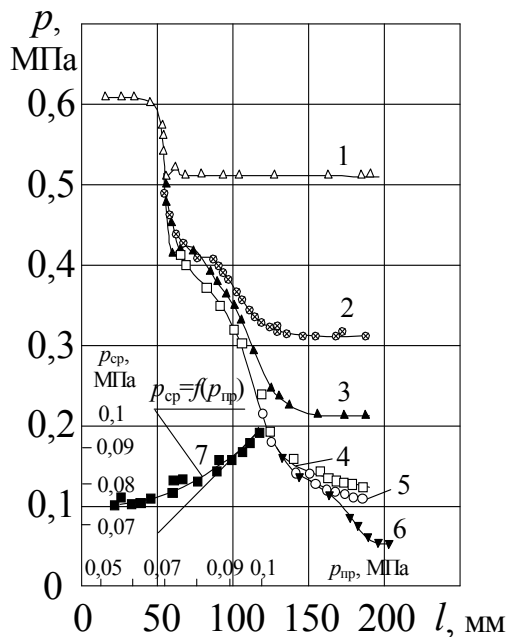


Рис.14.5. К кризису течения в сопле Лавая. $p_0^* = 0,6$ МПа, $T_0^* = 426$ К,
1 – $p_{пр} = 0,51$ МПа; 2 – 0,31; 3 – 0,21;
4 – 0,11; 5 – 0,1; 6 – 0,056.

показанных на рис.14.6, позволяет ввести понятие "длинных" и "коротких" сопел Лавая. Так, для коротких сопел $\bar{l}_{pc} = \frac{l_{pc}}{d_r} < 30$ ($d_r = 4$ мм) с ростом

температуры воды T_0^* давление на срезе растет как у цилиндрических каналов, а у длинных – падает, т.е. в коротких соплах при $\frac{F_{cp}}{F_r} = 6,25 = const$

срабатывается меньший теплоперепад. В опытах давление на срезе сопла Лавая было всегда незначительно выше противодействия, что исключало отрыв потока от стенок ($p_{cp} = 0,124 \dots 0,175$ МПа). С уменьшением длины расширяющейся части сопла шум при его работе возрастает, что можно объяснить уменьшением времени нахождения потока в канале и завершением процесса "развала" жидкой фазы вне канала. Короткие сопла работают с явным недорасширением, о чем свидетельствуют как повышенное давление на срезе сопла, так и форма струи.

Длина расширяющейся части сопла оказывает значительное влияние на его эффективность, так как завершенность процессов тепло- и массопереноса при движении неравновесного двухфазного потока в канале зависит при прочих равных условиях от времени нахождения жидкой фазы в канале.

противодействия приводит к падению давления вдоль сопла (кривая 6) и лишь при противодействии 0,056 МПа стабилизируется давление на срезе сопла и становится равным 0,075 МПа (см. кривую 7). В последнем случае можно предположить, что с уменьшением противодействия возрастает степень сухости равновесной туманообразной части потока, а, следовательно, растет и термодинамическая скорость звука ($a \sim \sqrt{x}$), что делает поток дозвуковым.

Некоторое повышение давления в области горла (кривые 1 и 2) свидетельствует о незначительном скачке конденсации в парожидкостном потоке. Анализ хода кривых,

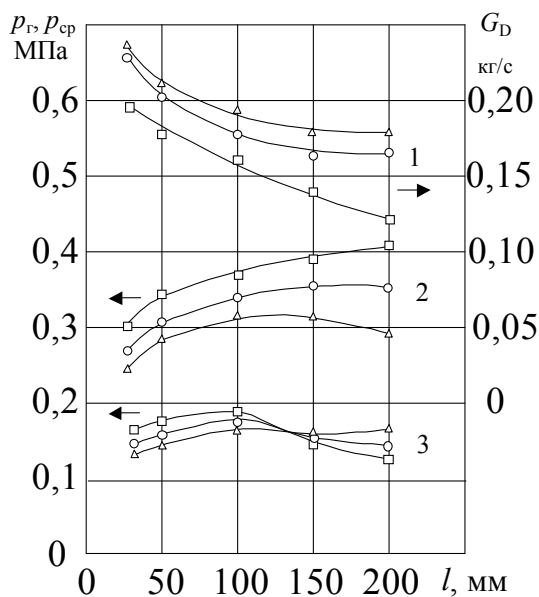


Рис.14.6.Изменение расхода, давления в горле и на срезе сопла Лавая в зависимости от длины расширяющейся части сопла. $p_0^*=0,5$ МПа, 1 — G_D ; 2 — p_g ; 3 — $p_{ср}$; \triangle $T_0^*=408$ К, \circ — 413, \square — 420.

Таким образом, увеличение длины канала способствует увеличению выхода паровой фазы, что приводит к росту скорости потока и повышению эффективности сопла. Однако при значительной протяженности канала начинают преобладать силы трения и эффективность сопла снижается. Так, экспериментальное исследование шести сопел Лавая с длиной расширяющейся части 25, 50, 100, 150 и 200 мм с диаметром горла 4 мм и $F_{ср}/F_g = 6,25$ при $p_0^*=0,5$ МПа и $t_0^* = 147$ С показали, что наибольшую эффективность ($\varphi_c \approx 0,8$) имело сопло с $l_{рс}=150$ мм, то есть $\bar{l}_{рс} = (l_{рс}/d_g)_{опт} = 37,5$; при $\bar{l}_{рс}=50$ коэффициент скорости снижался до 0,7. При $\bar{l}_{рс} = 6,25$

коэффициент скорости составлял всего 0,45 [40].

Увеличение длины расширяющейся части сопла Лавая приводит к росту давления в горле и уменьшению расхода. С ростом угла раскрытия расширяющейся части сопла давление в горле падает, а расход увеличивается.

Установлено, что парогенерирующие решетки могут быть мощным средством создания потоков близких к равновесным, что дает возможность повысить эффективность и упростить расчет сопел.

Исследовались сопла, у которых парогенерирующая решетка (диск с цилиндрическими каналами) устанавливалась как на входе, так и в минимальном сечении сопла. Были определены соотношения между живым сечением решетки и характерными сечениями сопла, обеспечивающие наибольшую эффективность [19,41], сделан вывод, что парогенерирующая решетка должна устанавливаться несколько выше минимального сечения. Это делает возможным создавать мелкодисперсные пузырьковые структуры при незначительных потерях, обусловленных трением, внезапным расширением потока и вторичными течениями.

Так как парогенерирующая решетка представляет собой диск с цилиндрическими каналами, то рассмотрим процессы в цилиндрическом канале с острой входной кромкой.

Характер изменения относительного критического давления $\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_0} = f\left(\frac{l}{d}\right)$ на срезе цилиндрического канала с острой входной кромкой

в зависимости от его относительной длины и различных значениях $\left(\frac{\Delta t_i}{t_s(p_0^*)}\right)$

показывает (см. рис.14.7), что у коротких каналов ($\frac{l}{d} \leq 10-12$) с ростом длины критическое давление растет, а у длинных падает. Это явление можно объяснить следующим образом. С увеличением длины время нахождения жидкости в канале возрастает, что приводит к образованию большего количества пара, однако при $\frac{l}{d} \leq 10-12$ интенсивность выделения паровой составляющей значительно выше нежели влияние сил трения, что и приводит к росту $\beta_{кр}$. У длинных каналов начинают преобладать силы трения над процессом парообразования, что приводит к падению критического давления.

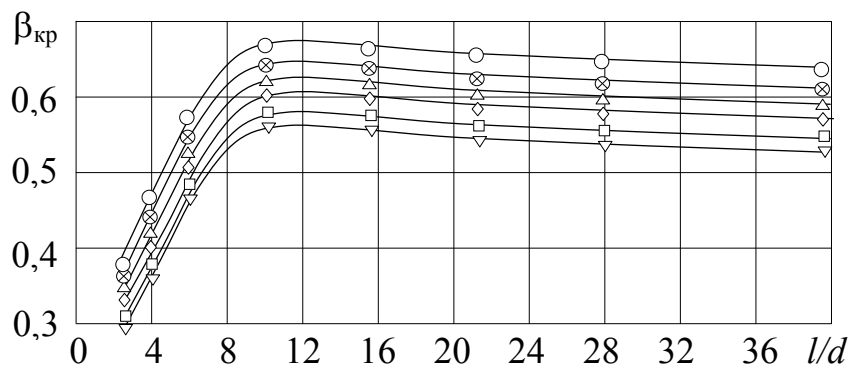


Рис.14.7. Характер изменения $\beta_{кр}$ в зависимости от l/d при различных значениях $\Delta t_H/t_s$. (с.165)

○ - $\Delta t_H/t_s=0,05$; ⊗ - 0,06; △ - 0,07; ◇ - 0,08; □ - 0,09; ▽ - 0,10.

В результате обработки наших опытных данных в диапазоне изменения давления $p_0^* = 0,4 - 0,6$ МПа и $\frac{\Delta t_H}{t_s} = 0,025 - 0,21$ нами (Бариловичем В.А. и Мирошниковым С.Ф) получены эмпирические уравнения позволяющие определить $\beta_{кр}$. Для цилиндрических каналов с $\frac{l}{d} = (3 - 4)$:

$$\beta_{кр} = 0,004 + 0,017 \frac{l}{d} - (0,07 - 0,011 \frac{l}{d}) \ln \frac{\Delta t_H}{t_s};$$

для каналов с $\frac{l}{d} = (5 - 9,4)$:

$$\beta_{кр} = 0,480 + 0,027 \frac{l}{d} - (1,27 + 0,044 \frac{l}{d}) \frac{\Delta t_H}{t_s};$$

для каналов с $\frac{l}{d} = (9,4 - 40)$:

$$\beta_{кр} = 0,75 - 0,0013 \frac{l}{d} - 1,65 \frac{\Delta t_H}{t_s}.$$

Погрешность определения $\beta_{кр}$ для каналов с $\frac{l}{d} = (3 - 9)$ не превышает 10 %, при $\frac{l}{d}$ больше 9,4 она меньше 5%.

Действительный критический расход горячей воды через цилиндрические каналы с острой входной кромкой при $p_0^* = 0,4 - 0,6 \text{ МПа}$ определим на основе двухслойной модели проф. Зысина В.А. [21] с учетом опытных значений $\beta_{кр}$ и метастабильности потока

$$\dot{G}_{дкр} = (0,115 + 0,159 \frac{\Delta t_H}{t_s(p_0^*)}) (\frac{\Delta t_H}{t_s(p_0^*)})^{-0,66} \dot{G}_{ткр},$$

где $\dot{G}_{ткр} = \rho_{п} c_{п} F_{к} \left(\frac{\rho_{ж} c_{ж}}{\rho_{п} c_{п}} - 1 \right) \left(\frac{1}{\frac{\rho_{п} c_{п}^2}{(M_{пн}^2 - 1) \rho_{ж} c_{ж}^2} + 1} \right)$ - теоретический

критический расход; $c_{п} = 2 \left(\int_{p_s}^{p_0^*} v_{ж} dp + c_{рж} T_0^* \left(1 - \frac{T_{кр}}{T_0^*} \left(1 + \ln \left(\frac{T_0^*}{T_{кр}} \right) \right) \right) \right)^{0,5}$ -

теоретическая скорость равновесного влажного пара; $\rho_{п} = \frac{\rho' \rho''}{x \rho' + (1-x) \rho''}$ -

плотность равновесного влажного пара; $x = \frac{c_{рж} T_{кр} \ln \left(\frac{T_0^*}{T_{кр}} \right)}{\tilde{r}}$ - изоэнтروпийная

степень сухости равновесного влажного пара; $c_{ж} = (2(p_0^* - p_{кр}) / \rho_{ж})^{0,5}$ -

теоретическая скорость жидкостного ядра; $M_{п} = c_{п} / a_{п}$; $a_{п} = \frac{\tilde{r} v_{п}}{(v'' - v')} (c_v T)^{0,5}$ -

термодинамическая скорость звука в равновесном влажном паре;

$v_{п} = x v'' + (1-x) v'$ - удельный объем равновесного влажного пара;

$c_v = x c_v'' + (1-x) c_v'$ - удельная изохорная теплоемкость со стороны двухфазной области; $F_{к} = f_{п} + f_{ж}$ - площадь поперечного сечения цилиндрического

канала; $p_{кр} = \beta_{кр} p_0^*$; $T_{кр} = f(p_{кр})$.

На рис.14.8 представлена зависимость безразмерной плотности тока $\left(\frac{\rho c}{\rho c_s} \right)_{ср} = \left(\frac{(\rho c)_{ср}}{(\rho c)_s} \right) = f(\Delta t_H / t_s)$ на срезе сопла Лавая традиционной формы с относительной длиной расширяющейся части сопла $l_{рс} / d_{г} = 41,5$ (кривая 1) и сопла Лавая, имеющего наибольшую эффективность $\phi_c = 0,87$ (кривые 2)

(геометрические размеры сопла показаны на рис.14.9), от относительного недогрева воды до температуры насыщения при заданном давлении перед соплом. Как видно из рисунка, при незначительных недогревах горячей воды до температуры насыщения парогенерирующая решетка значительно уменьшает метастабильность потока. Так, при $\Delta t_H/t_s = 0,03$ отношение безразмерных плотностей $(\overline{\rho c})/(\overline{\rho c})_{l/d=9}|_{cp} \approx 1,4$.

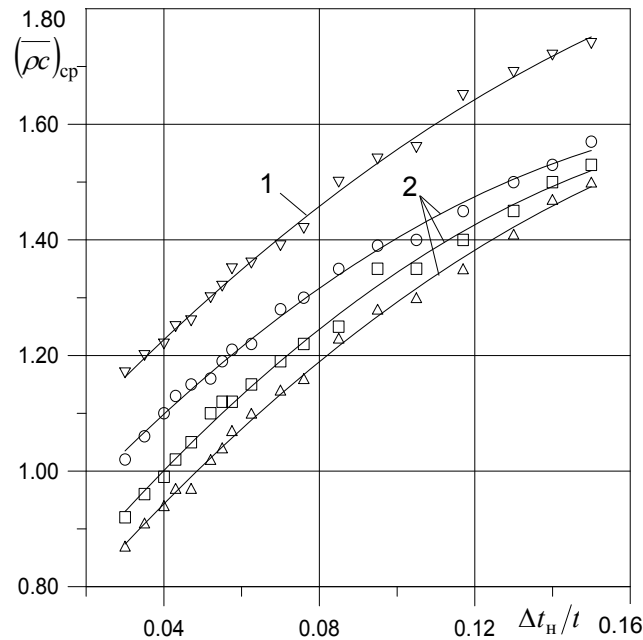


Рис.14.8. Ход кривых $(\overline{\rho c})_{cp} = f(\Delta t_H/t_s)$, $p_0^* = 0,6$ МПа. 1 – сопло Лавалья традиционной формы; 2 – предлагаемое сопло: \circ - $(l/d)_p = 3$; \square - 6; \triangle - 9.

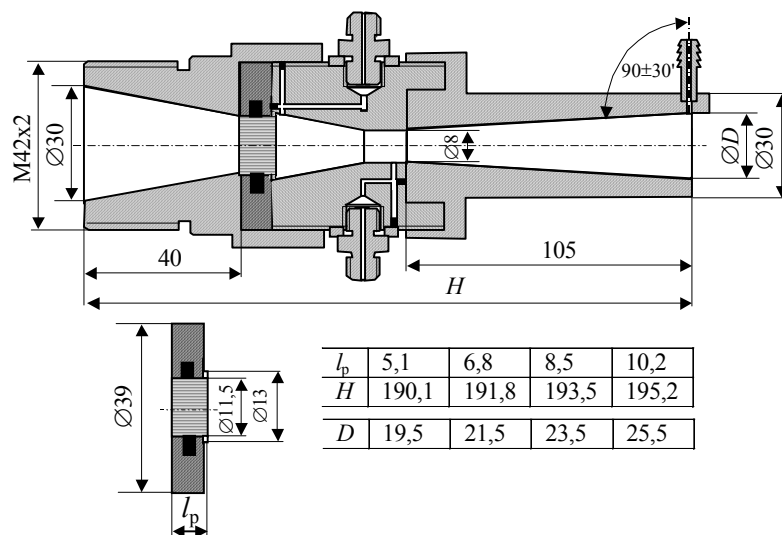


Рис.14.9. Продольный разрез предлагаемого высокоэффективного сопла Лавалья с парогенерирующей решеткой.

Рис.14.10 иллюстрирует изменение действительной, изоэнтропийной и безразмерной плотности тока, определенных по замеренному давлению в зависимости от относительного недогрева воды до температуры насыщения.

Из хода кривых видно, что действительная плотность тока уменьшается со снижением недогрева воды. При $\Delta t_H/\Delta t_s = 0,04$ плотность тока в горле в 6,3 раза выше плотности тока на срезе при данных физических условиях. В горле сопла значительная метастабильность потока, растущая с увеличением относительного недогрева, приводит к падению статического давления из-за снижения интенсивности парообразования. При расчете безразмерной плотности тока $(\overline{\rho c}) = (\rho c)_d / (\rho c)_s$ изэнтропийная плотность тока $(\rho c)_s$ определялась по измеренному давлению, что приводило к ее завышению в горле сопла. Этим объясняется падение $(\overline{\rho c})_r$ с увеличением относительного недогрева и создается впечатление, что с ростом недогрева воды до температуры насыщения метастабильность потока уменьшается.

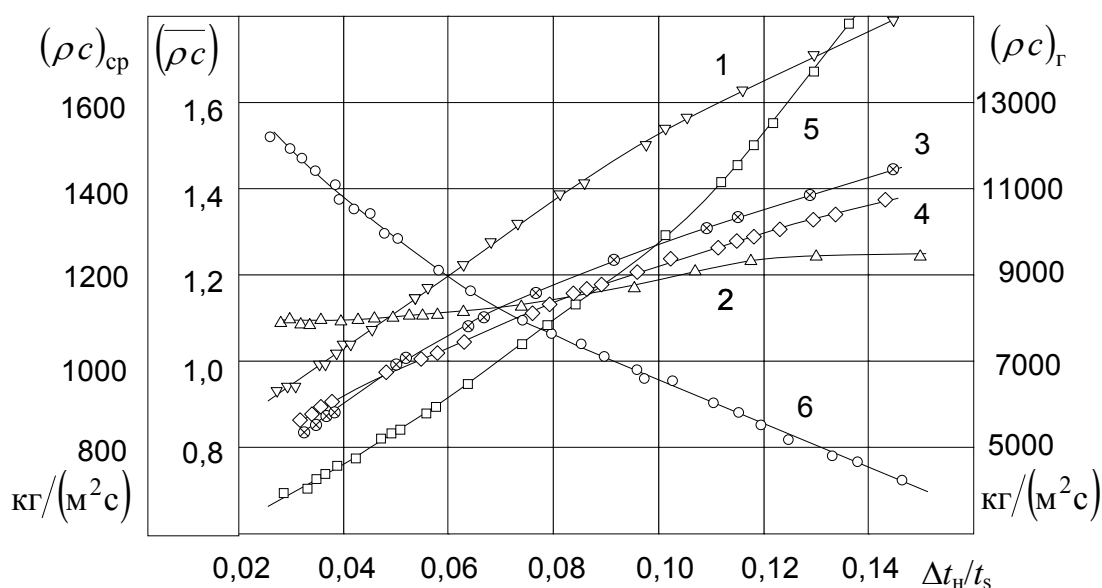


Рис.14.10. Влияние относительного недогрева воды на плотность потока на срезе и в горле сопла. 1 - $(\rho c)_{д ср}$; 2 - $(\rho c)_{с ср}$; 3 - $(\overline{\rho c})_{ср}$; 4 - $(\rho c)_{д г}$; 5 - $(\rho c)_{с г}$; 6 - $(\overline{\rho c})_r$.

Обработка опытных данных по плотности тока в безразмерном виде позволила получить простые эмпирические зависимости $(\overline{\rho c}) = f(\Delta t_H/t_s)$.

В диапазоне давлений 0,5...0,8 МПа для сопла с наибольшей эффективностью получены формулы, позволяющие определять безразмерную и действительную плотности тока в горле и на срезе сопла в зависимости от $\Delta t_H/t_s$ с относительной погрешностью, не превышающей одного процента:

$$\Delta t_H/t_s = 0,03 \dots 0,06$$

$$(\rho c)_r = 1,76 - 9,63 \Delta t_H/t_s, \quad (\rho c)_{ср} = 1,89 - 0,68 \lg(\Delta t_H/t_s);$$

$$\Delta t_H/t_s = 0,06 \dots 0,13$$

$$(\rho c)_r = 1,52 - 5,86 \Delta t_H / t_s, \quad (\rho c)_{cp} = 0,785 - 4,77 \Delta t_H / t_s.$$

Возрастание метастабильности потока в горле с увеличением $\Delta t_H / t_s$, как отмечалось выше, приводит к падению давления в горле (рис.14.11) и росту расхода через сопло. При этом статическое давление на срезе возрастает, так как увеличивается количество жидкостных объемов, являющихся источниками массы пара. При $\Delta t_H / t_s > 0,13$ из-за снижения интенсивности испарения давление на срезе начинает падать. Ниже приводятся формулы, позволяющие определить относительное давление

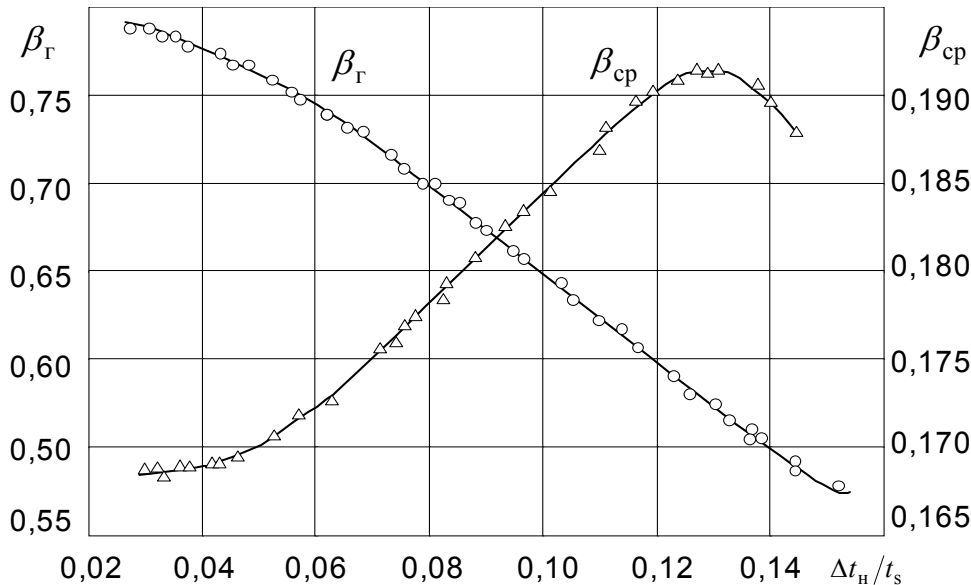


Рис.14.11. Зависимость β_r и β_{cp} от $\Delta t_H / t_s$.

$\beta = \frac{P}{P_0^*}$ в горле и на срезе сопла (отверстие диаметром 0,8 мм для замера

статического давления находилось на расстоянии 1 мм от среза сопла):

$$\Delta t_H / t_s = 0,03 \dots 0,06: \quad \beta_r = 10^{-(0,074 + 0,833 \Delta t_H / t_s)}, \quad \beta_{cp} = 1,83 - 0,011 \lg(\Delta t_H / t_s);$$

$$\Delta t_H / t_s = 0,06 \dots 0,13: \quad \beta_r = 0,893 - 2,46 \Delta t_H / t_s, \quad \beta_{cp} = 0,152 - 0,33 \Delta t_H / t_s.$$

Опытные исследования тяговых характеристик сопла с решеткой при различных значениях относительной длины каналов решетки $(l/d)_p$ позволили выявить влияние недогрева на коэффициент скорости сопла. Из хода кривых $\varphi_c = f(\Delta t_H / t_s)$ (рис.14.12) видно, что для всех решеток при определенном $\Delta t_H / t_s$ существует минимум эффективности сопла. Этот минимум может быть объяснен большими гидравлическими потерями в высоковлажном потоке при незначительной интенсивности фазового перехода. С увеличением $(l/d)_p$ минимум φ_c смещается в сторону меньших недогревов. При этом сопло с наибольшим значением $(l/d)_p$ имеет более

высокий коэффициент скорости по сравнению с остальными, когда

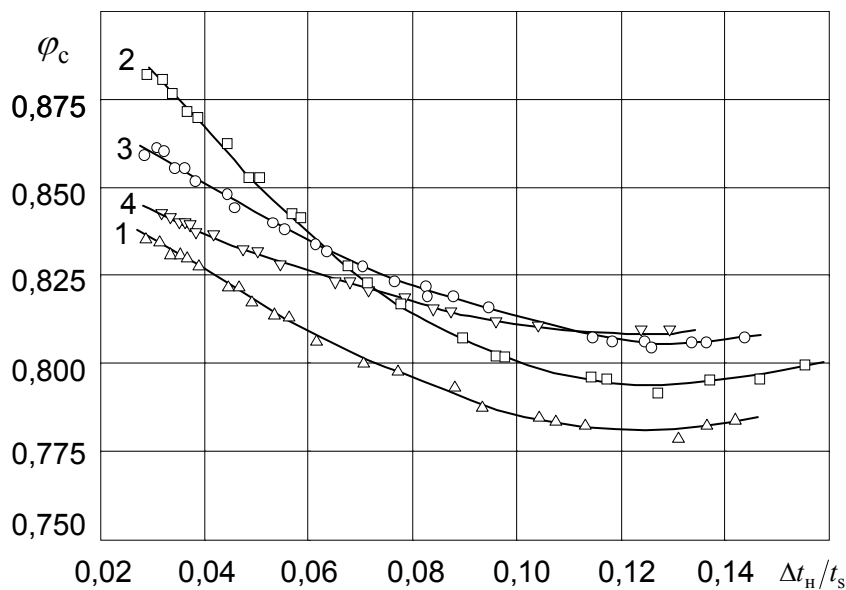


Рис.14.12. Изменение коэффициента скорости сопла с различными решетками.

1- $(l/d)_p = 3$; 2-6; 3-9; 4-12.

$\Delta t_n / t_s > 0,11$. Рост сил трения с увеличением $(l/d)_p$ при малых относительных недогревах уменьшает эффективность сопла. Так, при увеличении относительной длины каналов решетки от 6 до 12 коэффициент скорости уменьшается на 0,035 (при $\Delta t_n / t_s = 0,03$). Пониженная эффективность сопла с $(l/d)_p = 3$ объясняется значительной неравномерностью потока.

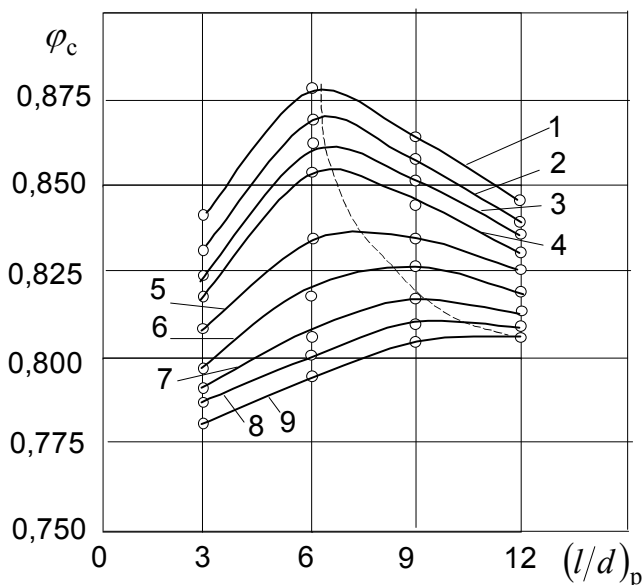


Рис.14.13. Зависимость $\varphi_c = f(l/d)_p$ при различных значениях $\Delta t_n / t_s$.

1 - $\Delta t_n / t_s = 0,03$; 2 - 0,037; 3 - 0,043; 4 - 0,049; 5 - 0,062; 6 - 0,075; 7 - 0,087; 8 - 0,100; 9 - 0,125.

Анализ зависимостей $\varphi_c = f(\Delta t_H/t_s)$ при $\Delta t_H/t_s = \text{const}$ показывает, что для каждого недогрева (см. рис.14.13) существует такое $(l/d)_p$, при котором коэффициент скорости принимает максимальное значение, причем с увеличением недогрева воды оптимальная величина $(l/d)_p$ возрастает.

Рис.14.14 иллюстрирует зависимость расхода воды через высокоэффективное сопло Лавалья – кривая 1, реактивной тяги - кривая 2,

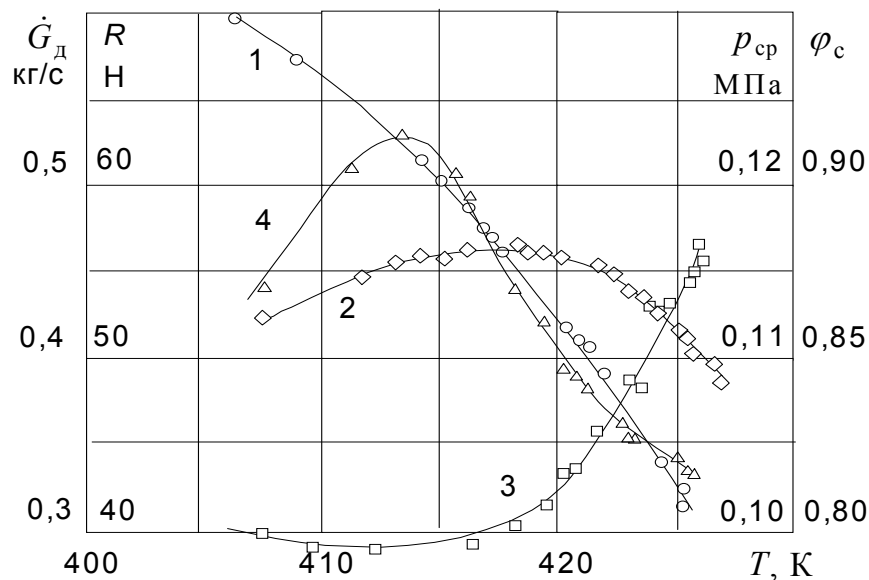


Рис.14.14. Характеристики предлагаемого сопла Лавалья в зависимости от начальной температуры воды на входе в сопло.

коэффициента скорости – кривая 3 и статического давления на срезе сопла - кривая 4 от температуры горячей воды на входе в сопло. Приведенные экспериментальные данные позволяют судить как о значении основных физических величин, так и характере их поведения. Обработка опытных данных по расходу горячей воды при критическом режиме истечения позволила получить для высокоэффективного сопла (рис.14.9) формулу

$$(\rho c)_d = \frac{G_d}{F_p} = 1,3434 p_0^{0,7512} (\Delta t_H/t_s (p_0))^{0,3719} (l/d)_p^{-0,0276},$$

где F_p - площадь поперечного сечения отверстий парогенерирующей решетки; $(l/d)_p$ - относительная длина канала решетки; d – диаметр канала решетки, которая справедлива при $p_0 = (0,5 \dots 0,8)$ МПа, $\Delta t_H/t_s (p_0) = 0,03 \dots 0,06$, $(l/d)_p = 6 \dots 10$.

Приведенные результаты и формулы относятся к соплам, у которых отношение живого сечения решетки к площади горла составляет 0,824, а диаметр парогенерирующих каналов равен 0,85 мм.

При определенном перепаде давления на решетке можно получить за решеткой высоковлажный поток с паро-капельной структурой, в этом случае расчет сопла существенно упрощается.

Ниже приводится система уравнений позволяющая выполнить расчет предлагаемого сопла Лаваля с парогенерирующей решеткой, у которого диаметр проточной части за решеткой в зависимости от продольной координаты определяется формулами:

$$D = D_{\text{вх}} - (D_{\text{вх}} - D_{\Gamma})z/l_{\text{СК}}, \text{ если } 0 \leq z \leq l_{\text{СК}};$$

$$D = D_{\Gamma}, \text{ если } l_{\text{СК}} < z \leq (l_{\text{СК}} + l_{\text{СИ}});$$

$$D = D_{\Gamma} + (D_{\text{ср}} - D_{\Gamma})(z - (l_{\text{СК}} + l_{\text{СИ}}))/l_{\text{СД}}, \text{ если } (l_{\text{СК}} + l_{\text{СИ}} + l_{\text{СД}}) \geq z \geq (l_{\text{СК}} + l_{\text{СИ}}).$$

$$\frac{dp}{dz} = \left\{ \frac{3}{4} c_x \rho_v c_v \frac{f_d}{D_d} \left(\frac{c_v}{c_d} - 1 \right) \frac{c_v}{c_d} - 1 \left[\left(\frac{c_d}{c_v} \right)^2 - \frac{\rho_v}{\rho_d} \right] + \right.$$

$$+ 6 \left(2 - \frac{c_d}{c_v} - \frac{c_v \rho_v}{c_d \rho_d} \right) \frac{f_d j_{d-v}}{D_d} + c_f \frac{c_v \rho_v}{2} \pi D - c_v \rho_v \frac{dF}{dz} \left. \right\} \times$$

$$\times c_v / \left\{ \left[\frac{c_v^2}{dp/d\rho_v} - \left(\frac{c_v}{c_d} \right)^3 \left(\frac{\rho_v}{\rho_d} \right)^2 \frac{G_d}{G_v} - 1 \right] f_v \right\}.$$

Слагаемые в правой части уравнения $\frac{dp}{dz}$ характеризуют воздействия на поток обусловленные силой сопротивления, потоком массы, силой трения и геометрией канала. Уравнение имеет предельный переход и при изэнтропийном течении пара в сопле принимает традиционный вид $dp/dz = -kM^2 p (dF/dz) / [(M^2 - 1)F]$.

$$\frac{dc_d}{dz} = \frac{3}{4} c_x \frac{\rho_v}{\rho_d} \frac{c_d}{D_d} \left(\frac{c_v}{c_d} - 1 \right) \frac{c_v}{c_d} - 1 - \frac{1}{\rho_d c_d} \frac{dp}{dz},$$

$$\frac{dc_v}{dz} = -\frac{3}{4} c_x \frac{f_d}{D_d} \frac{c_d^2}{c_v f_v} \left(\frac{c_v}{c_d} - 1 \right) \frac{c_v}{c_d} - 1 - \frac{1}{\rho_v c_v} \frac{dp}{dz} - \frac{c_f}{2} \frac{c_v \pi D_n}{f_v} - \frac{6(c_v - c_d) f_d j_{d-v}}{c_v \rho_v f_v D_d},$$

$$dG_v/dz = \Delta j \pi D_d^2 F n_v = 6 \Delta j G_d / (D_d c_d \rho_d),$$

$$dD_d/dz = -2 \Delta j / (c_d \rho_d), \quad dx/dz = \Delta j \pi D_d^2 n_v F / G, \quad dT_d/dz = -\frac{6}{c_{\text{пж}} \rho_d D_d c_d} (\alpha(T_d - T_v) + \tilde{r} \Delta j),$$

где c_x -коэффициент сопротивления капли; c_f коэффициент трения пара о стенку;

c_d – скорость капель; c_v – скорость пара; ρ_d – плотность воды; ρ_v – плотность пара; F, f_d – площади поперечного сечения сопла и жидкостного потока; D, D_d – диаметр канала и капли; j_{d-v} – плотность потока массы от испаряющейся капли; $n_v = \dot{n} / c_d / F$ – объемная концентрация капель; $\dot{n} = 6G_d / (\pi D_d^3 \rho_d)$ – поток капель, с^{-1} ; $c_{\text{пж}}$ – удельная теплоемкость воды; α – коэффициент теплоотдачи; r – удельная теплота парообразования; T_d – температура капли; G – расход воды через сопло;

$$\Delta j = j_{d-v} - j_{v-d} = \frac{\chi}{\sqrt{2\pi\tilde{R}_v}} \left(\frac{p(T_d)}{\sqrt{T_d}} - \frac{p}{\sqrt{T}} \right); \quad \chi = \frac{35}{p^{0.56}}; \quad T_v = f(p); \quad c_f = f(\text{Re}_v);$$

$$c_x = f(\text{Re}_d); \quad G_d = G - G_v; \quad f_d = \dot{G}_d / (\rho_d c_d); \quad f_v = F_n - f_d.$$

На рис.14.15 показаны результаты расчета

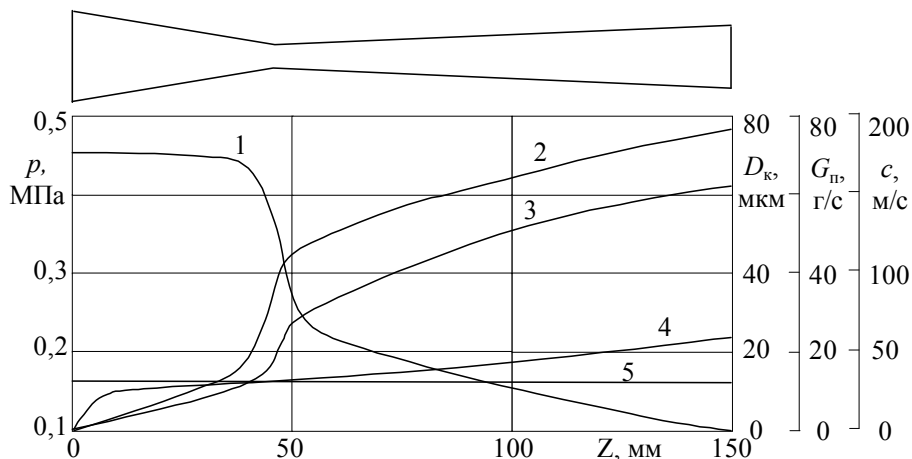


Рис.14.15. Расчетное изменение статического давления (1), скорости пара (2) и капель (3), диаметра капель (5) и потока массы пара (4) вдоль продольной оси сопла Лавалья.

Выполненные исследования, в которых активное участие принимали аспиранты Мирошников С.Ф. и Стариков В.И., вскрывают основные закономерности течения вскипающего потока в соплах Лавалья и позволяют создавать высокоэффективные сопла, работающие на горячей воде при низких начальных давлениях. Результаты исследований могут быть использованы при создании струйных аппаратов и турбин, работающих на вскипающей воде.

Опыты со свободными струями высоко-влажного пара, образующегося в результате расширения перегретой воды в сопле Лавалья, и холодной воды истекающих в атмосферу показали, что при увеличении коэффициента инжекции происходит более интенсивная конденсация парового потока приводящая к смещению минимального сечения струи вверх по потоку и увеличения ее конусности. Распределение полного давления поперек струи в зависимости от продольной координаты, измеренное методом “пролива”, показано на рис. 14.16. Из рисунка видно, что с увеличением координаты полное давление в центре потока вначале растет, а затем убывает. Максимальному давлению отвечает минимальное сечение струи. Характер изменения полного давления и температуры измеренной термопарой в центре потока вдоль продольной координаты показан на рис. 14.17.

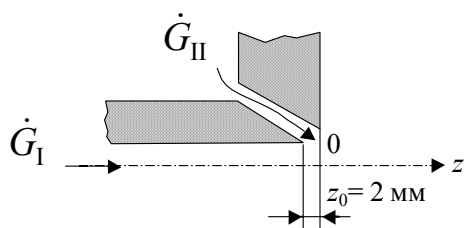
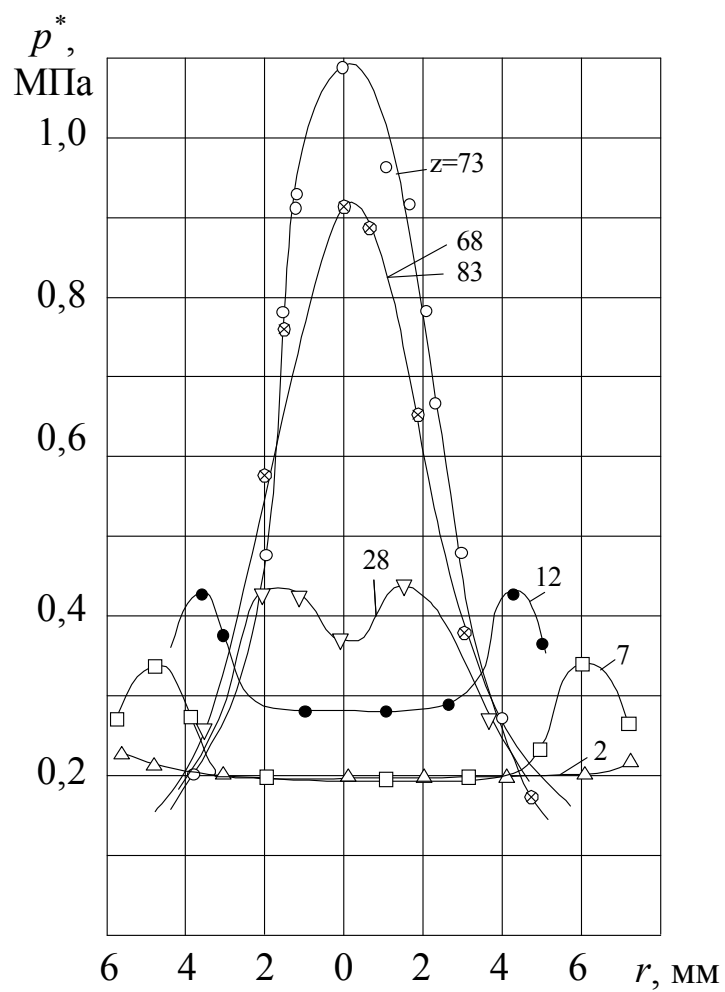


Рис.14.16. Изменение полного давления по сечению пароводяной конденсирующейся свободной струи.
 $d_{грс}=3,5$ мм, $d_{сррс}=15$ мм, $p_0^*=0,7$ МПа, $T_0^*=431,5$ К,
 $G_{II}=0,168$ кг/с.

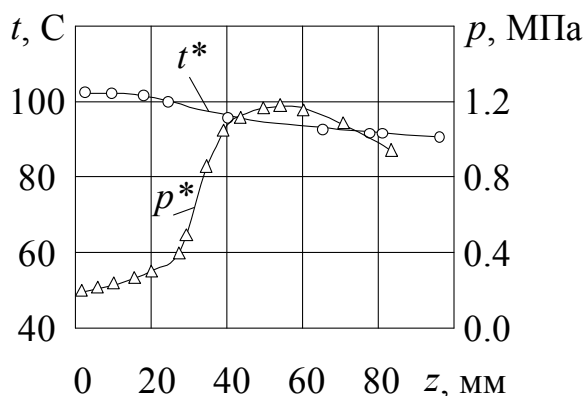


Рис.14.17. Ход кривых p^* и t^* вдоль продольной оси пароводяной конденсирующейся свободной струи.

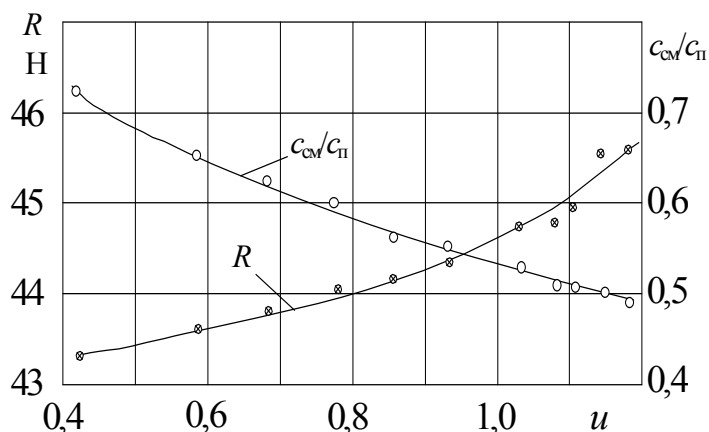


Рис.14.18. Кривые $c_{см}/c_{п}=f(u)$ и $R=\varphi(u)$ для смесителя со свободной конденсирующейся струей.

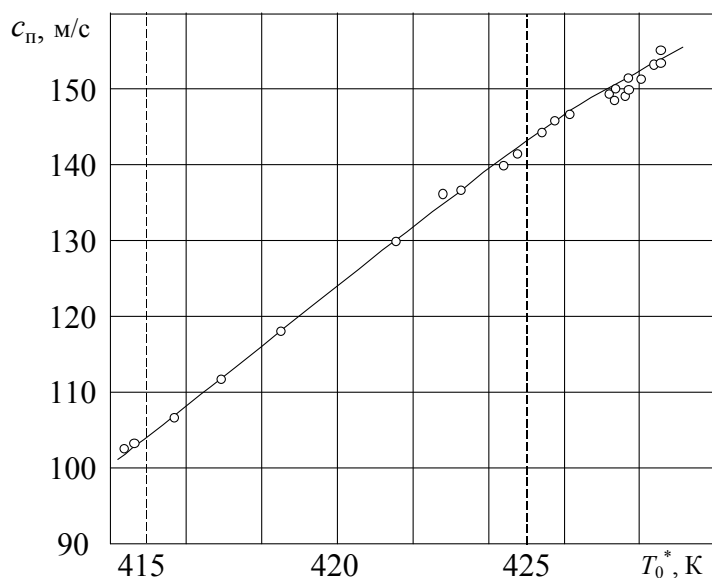


Рис.14.19. Зависимость $c_{п}=f(T_0^*)$ для разгонного сопла.

на рис. 14.19. При $T_0^* = 427$ К сопло имело $\varphi=0.85$. Из рисунков для данного режима можно определить скорость смеси $c_{\dot{n}i}$ парожидкостной струи.

Так как потеря кинетической энергии в двухфазных потоках значительно выше чем в однофазных, то часто возникает вопрос о протяженности и форме каналов аппаратов, где в качестве рабочего тела используется двухфазная среда, с целью минимизации потерь. Так, например, при создании струйных аппаратов (инжекторов или эжекторов) протяженность камеры смешения оказывает существенное влияние на эффективность (степень повышения давления в аппарате).

С увеличением коэффициента инжекции у инжектора с длинной камерой создаются условия для отрыва потока от стенок канала (в этом случае протяженность конденсирующейся струи меньше длины камеры смешения) и в еще большей степени возрастают гидравлические потери.

Исследование на установке взвешивания смесителя со свободной конденсирующейся струей (см. рис. 14.16) позволило определить реактивную силу парожидкостного потока в зависимости от коэффициента инжекции (см. рис. 14.18). Характеристика сопла Лавалья с парогенерирующей решеткой с $(l/d)_p=9$ используемого в смесителе при $p_0^*=0.6$ Па. представлена

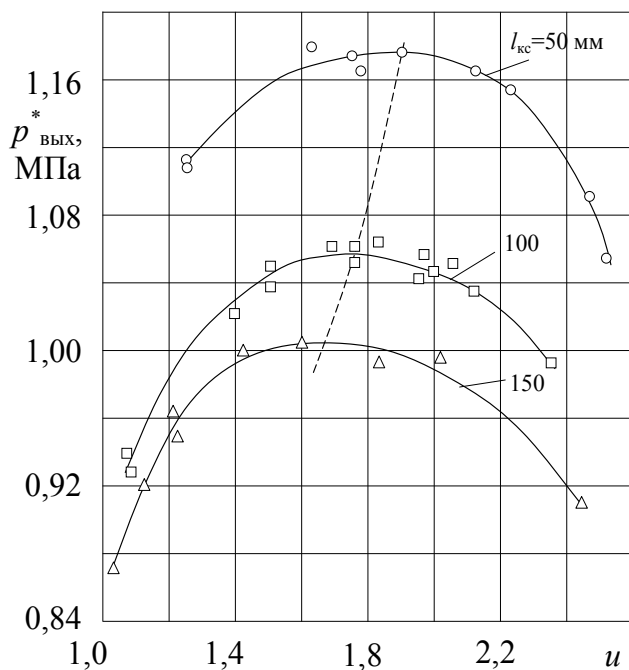


Рис. 14.20. Влияние длины камеры смещения на давление за инжектором $p_0^*=0,8$ МПа, $T_0^*=439$ К, $T_{хв}^*=281$ К, $d_1=4$ мм

$l_{ц.диф} / d_2 = 7,5$ и диаметре горла и среза сопла Лавала традиционной формы 3,5 и 15 мм соответственно.

Рассмотрим процессы в диффузоре инжектора. На рис. 14.21 показано изменение статического давления вдоль диффузора с “затянутым горлом” ($l_{ц.диф} / d_2 = 12,4$ и $d_2 = 4,5$ мм), выполненного из органического стекла. На графике по оси ординат отложены две шкалы. Левая относится к кривым: 3,4,5,6 и 7 (работающий инжектор). Правая – к кривым 1 и 2, когда в инжектор подавалась только холодная вода. Измеренное давление вдоль цилиндрического канала при течении холодной воды показало полное совпадение с $\Delta p_{тр.}$, подсчитанным по формуле Дарси, что давало право на проведение дальнейших исследований. Из рисунка видно, что без нагрузки (вентиль на выходе инжектора полностью открыт) процесс в цилиндрическом канале практически изобарный (см. режимы 3, 4, 7). Увеличение коэффициента инжекции u снижает давление в канале (кривая 7). С уменьшением u возрастает градиент давления на начальном участке и растет степень сухости потока, что не позволяет полностью сконденсировать паровую фазу в скачке конденсации (на выходе из диффузора были видны пузырьки пара – кривая 5). Из хода кривых (5, 6, 7) видно, что в конце канала с увеличением u растет градиент давления, а, следовательно, и давление на выходе инжектора.

Наши опыты с инжекторами, работающими на перегретой воде, близкой к состоянию насыщения (недогрев составлял 3-5 С) при $\delta_0^* = 0,6-0,8$ МПа, показали, что из трех конических камер длиной 0,15; 0,1 и 0,05м наибольшую степень повышения давления

$$\pi^* = \frac{p_{вых}^*}{p_{вх}^*} = 1,8-2 \quad \text{имел инжектор с}$$

самой короткой камерой, при этом максимум π^* с уменьшением $l_{кц} / d_2$ смещался в сторону больших значений u (см. рис. 14.20).

Максимальное значение π^* было получено при $l_{кц} / d_2 = 12,5$, относительной протяженности

цилиндрической части диффузора

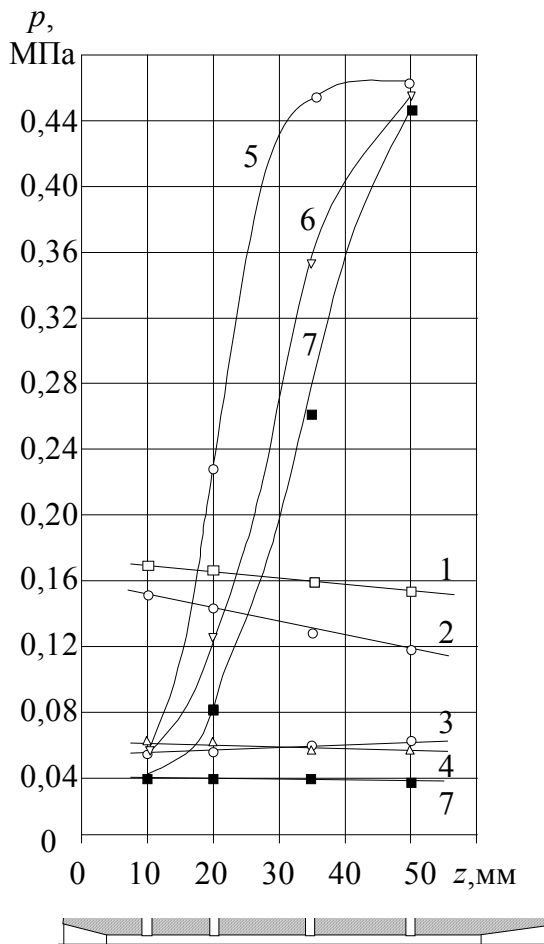


Рис. 14.21. Изменение статического давления вдоль цилиндрической части диффузора.

кривая	\dot{G}_{II} кг/с	p_0^* МПа	p_6^* МПа	T_0^* К	T_6^* К	u	$\lambda_{тр}$
1	0,124				286,5		0,034
2	0,158				285		0,037
3	0,166	0,7	0,196	427	285	1	
4	0,173	0,7	0,18	428	286	1,09	
5	0,169	0,7	0,18	429	285	0,9	
6	0,169	0,7	0,18	429	285	1,1	
7	0,218	0,7	0,08	429	286	1,39	
	
	0,220				287	1,44	

физических условиях и $u = 1,5$ максимальное давление за инжектором было получено с диффузором, у которого $l_r/d_r = 7,5$.

Рассмотрим влияние цилиндрической проставки диффузора на эффективность инжектора. В высоко-влажном паре скачок конденсации имеет значительную протяженность и при короткой цилиндрической части диффузора он может выйти в расширяющуюся часть канала, что приведет к дополнительным потерям, обусловленным отрывом потока от стенок. Увеличение длины цилиндрической части диффузора больше протяженности скачка приведет к росту потерь от трения и снижению эффективности инжектора. Кроме того, как показали опыты, в этих условиях наблюдалась неустойчивая работа аппарата, ухудшался его запуск. Поэтому существует такая длина цилиндрической части диффузора, при которой имеет место максимальное повышение давления в скачке конденсации. Данное положение иллюстрируется на рис. 14.22. В опытах использовались диффузоры с $l_r/d_r = 0,5; 1; 3; 7,5; 12,5$ мм. Как видим, при данных

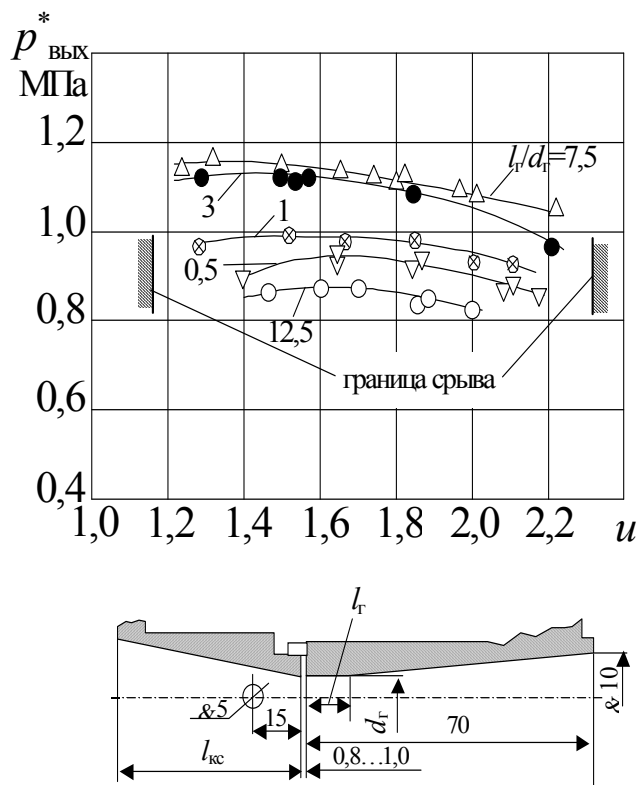


Рис. 14.22. Зависимость конечного давления за инжектором от коэффициента инжекции при различных относительных длинах цилиндрической части диффузора l_r/d_r .

$p_0^* = 0,6$ МПа, $T_0^* = 426...428$ К, $T_6^* = 279...283$ К, диаметр горла сопла 3,5 мм, диаметр среза сопла 15 мм, длина камеры смешения 54 мм, диаметр горла диффузора 4 мм.

Как отмечалось выше, гидропаровые турбины (ГПТ), работающие на вскипающих потоках могут найти широкое применение в технике [53,55]. Ниже приводятся результаты опытного исследования модели ГПТ мощностью 100 кВт и результаты численного эксперимента.

На рис.14.23 приведены опытные данные - зависимость внутреннего относительного КПД и действительной мощности от характеристического числа при степени парциальности 0,15, где c_t – теоретическая скорость на срезе сопла при изоэнтروпийном расширении.

На основании созданной модели расчета проточной части гидропаровой турбины (ГПТ), работающей на перегретой воде, был выполнен численный эксперимент по определению основных характеристик ГПТ в зависимости от характеристического числа $u/c_{см}$,

где u – окружная скорость на среднем радиусе, $c_{см} = \left(\frac{\dot{G}_k c_k^2 + \dot{G}_n c_n^2}{\dot{G}_k + \dot{G}_n} \right)^{0,5}$ – средняя

скорость смеси на срезе сопла. КПД турбины определялся как отношение мощности, полученной из расчета к изоэнтропийной мощности. Результаты, представленные в таблице 1, получены при следующих условиях: $p_0^* = 0,5$ МПа, $T_0^* = 422$ К, $G_d = 1,73$ кг/с – расход горячей воды через ГПТ при парциальности 0,15 (работало три блока сопел (в блоке три сопла) из двадцати). Здесь ω – угловая скорость, i_k , i_n – угол атаки капель и пара соответственно, N – расчетная мощность турбины при степени парциальности равной единице, $N_{экс}$ – расчетная мощность при парциальности 0,15.

Таблица 1.

u/c_{cm}	n	u	ω	i_k	i_{II}	$N_{экс}$	N	η
-	об/мин	м/с		град	град	кВт	кВт	-
0.2937	2500	36.91	261.79	6.72	8.9	7.752	51.683	0.384
0.3524	3000	44.296	314.15	4.51	7.52	8.613	57.425	0.427
0.3994	3400	50.2	356.03	2.47	6.28	9.14	60.938	0.453
0.4230	3600	53.16	376.98	1.34	5.62	9.354	62.363	0.4638
0.4464	3800	56.109	40.320	0.14	4.92	9.53	63.537	0.4726
0.4581	3900	57.58	408.39	-0.494	4.56	9.612	64.086	0.4767
0.4699	4000	59.06	418.86	-1.15	4.19	9.675	64.504	0.4798
0.4817	4100	60.538	429.33	-1.83	3.817	9.74	64.937	0.4817
0.5169	4400	64.97	460.75	-4.03	2.62	9.875	65.835	0.4897

Как видно из таблицы, характер поведения кривых КПД и мощности от характеристического числа соответствует традиционному распределению этих величин в паровых турбинах. Однако разработанная модель правильно отражает поведение потока только при положительных углах атаки. Отметим,

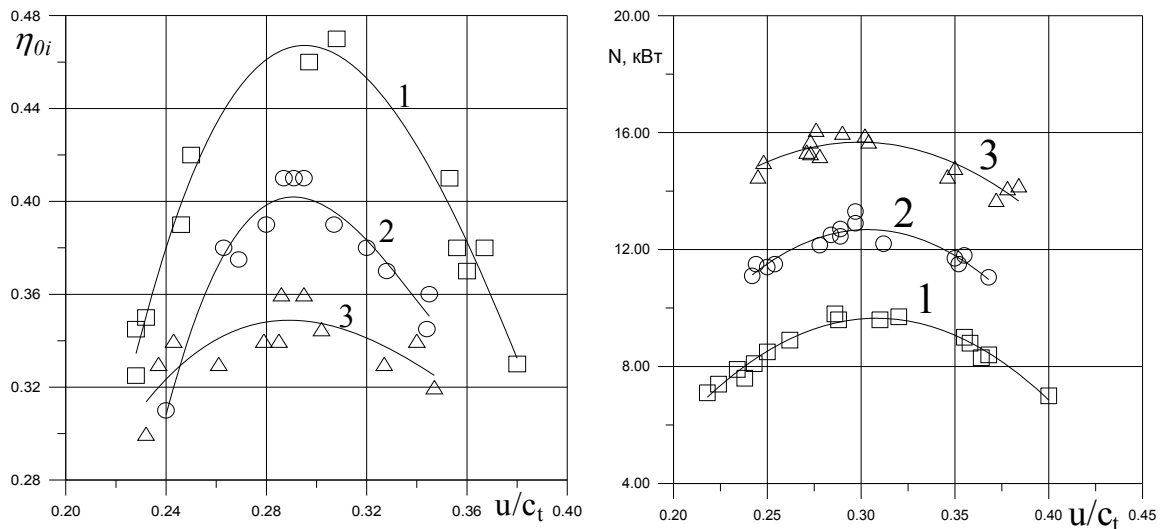


Рис. 24.23. Экспериментальная зависимость к.п.д и мощности от u/c_t при парциальности 0,15. 1 – $p_0^*=0,5$ МПа, $T_0^*=422$ К, 2 – $p_0^*=0,6$ МПа, $T_0^*=427...429$ К, 3 – $p_0^*=0,7$ МПа, $T_0^*=433...435$ К,

что расчетные результаты удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными в области максимумов мощности и КПД. Так, в опытах при $\omega=414$ 1/с и $u=57,96$ м/с при парциальности 0,15 была получена мощность турбины $N_d=9,674$ кВт, $\eta_{oi}=0,436$. Расчет при $\omega=418.86$ 1/с и $u=59,06$ м/с дал значение 9,675 кВт.

В таблице 2 представлены данные при коэффициенте скорости сопла 0.856. Как видим, применение сопел высокой эффективности позволяет создавать гидропаровые турбины с более высоким КПД.

Таблица 2.

$u/c_{см}$	n	U	ω	i_k	$i_{п}$	$N_{экс}$	N	η
0.265	2500	36.65	261.8	7.457	9.547	10.084	67.228	0.45
0.297	2800	41.05	293.22	6.359	8.869	10.853	72.353	0.484
0.318	3000	43.98	314.16	5.576	8.394	11.305	75.37	0.504
0.339	3200	46.91	335.1	4.746	7.901	11.72	78.13	0.523
0.36	3400	49.85	356.05	3.868	7.388	12.099	80.657	0.54
0.381	3600	52.78	376.99	2.936	6.855	12.43	82.868	0.554
0.403	3800	55.71	397.94	1.945	6.299	12.727	84.85	0.568
0.424	4000	58.64	418.88	0.892	5.72	12.985	86.564	0.579
0.445	4200	61.58	439.82	-0.229	5.117	13.202	88.01	0.589

Переход на высокие начальные давления горячей воды, на наш взгляд, должен привести к дальнейшему росту эффективности ГПТ, о чем свидетельствуют расчеты, представленные в таблице 3, полученные при следующих исходных данных: $G_{гв}=11.5$ кг/с, $p^*_0=13,3$ МПа, $T^*_0=598$ К, $p_{ос}=0,1$ МПа. Расчет сопла показал, что при работе на атмосферу скорость пара на срезе сопла составила 683.7 м/с, скорость капель 611.6 м/с, а коэффициент скорости сопла оказался равным 0.866.

Таблица 3.

$u/c_{см}$	n	U	ω	i_k	$i_{п}$	$N_{экс}$	N	η
0.298	13000	190.59	1361.36	6.207	7.314	230.304	1535.363	0.487
0.321	14000	205.25	1466.08	5.339	6.602	239.19	1594.598	0.506
0.344	15000	219.91	1570.8	4.416	5.851	246.739	1644.927	0.522
0.367	16000	234.57	1675.52	3.431	5.057	253.01	1686.732	0.536
0.389	17000	249.23	1780.24	2.381	4.217	258.175	1721.17	0.547
0.435	19000	278.55	1989.68	0.056	2.385	265.971	1773.141	0.563

15. Конденсация в спутных потоках

В сложных энергетических системах нередко возникает необходимость смешения потоков с различными начальными параметрами и физическими свойствами.

Рассмотрим смешение двух спутных потоков, сопровождающееся фазовыми переходами, например, конденсацией парового потока в потоке жидкости.

В фундаментальной монографии "Теория турбулентных струй" под редакцией Г.Н. Абрамовича [34] содержатся важнейшие результаты в области теоретических и экспериментальных исследований турбулентных струйных течений и методы расчета струй в различных устройствах. Однако в ней рассматриваются лишь газожидкостные струи, возникающие при истечении неконденсирующегося газа в жидкость, т.е. фазовые превращения не рассматриваются. Модель такого процесса представлена на рис. 15.1

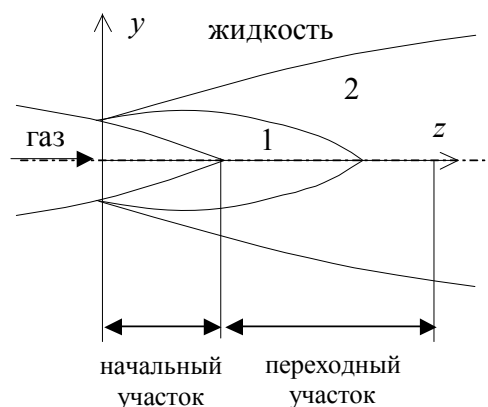


Рис. 15.1. Модель двухфазной струи.

1- газокапельная структура,

2 – пузырьковая структура.

В работе Б.Ф. Гликмана [35] дается теоретическое решение задачи о конденсации плоской струи пара в пространстве, заполненном неподвижной жидкостью. Определяется положение поверхности конденсации в зависимости от параметров пара и жидкости, рассматривается теоретический профиль скорости в пограничном слое на начальном участке струи (рис. 15.2), однако изменение параметров в самой паровой струе не анализируется

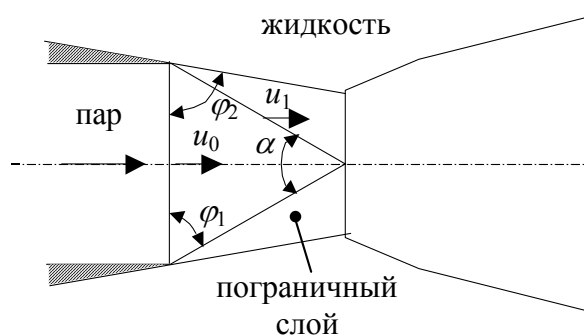


Рис. 15.2. Гидродинамическая схема процесса

Движение в пограничном слое плоско-параллельной струи несжимаемой жидкости описывается уравнением

$$\ddot{F} + F = 0, \quad (15.1)$$

где $F(\varphi)$ – производная от которой описывает профиль безразмерной скорости в пограничном слое струи:

$$\frac{u}{u_1} = \dot{F}(\varphi), \quad (15.2)$$

где u_1 – скорость на поверхности конденсации, $\varphi = y/ax$ – одна из безразмерных координат, в которых решается задача, a – эмпирическая константа, характеризующая структуру струи.

Решение уравнения (15.1) имеет вид:

$$F(\varphi) = C_1 e^{-\varphi} + C_2 e^{\frac{1}{2}\varphi} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\varphi\right) + C_3 e^{\frac{1}{2}\varphi} \sin\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\varphi\right). \quad (15.3)$$

Определив из граничных условий константы C_1 , C_2 , C_3 , φ_1 , φ_2 и u_1 , можно из (15.2) рассчитать теоретический профиль скорости u в пограничном слое на начальном участке струи.

Расчет положения поверхности раздела фаз при конденсации осесимметричной струи пара в холодной жидкости с энергетических позиций рассмотрено в [36]. В основу решения задачи положено уравнение (рис.15.3):

$$\rho c_p \left(w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_T(x) \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{1}{x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \sin \theta_0 + \frac{\partial T}{\partial y} \cos \theta_0 \right) \right]. \quad (15.4)$$

Аналогичный подход изложен в [37]. В [38] предложено критериальное уравнение, которое дает возможность оценить теплообмен между струей пара и объемом жидкости

$$Nu = \frac{\bar{\alpha} D}{\lambda_{ж}} = 6,5 Re^{0,6} Pr_{ж}, \quad (15.5)$$

Рис.15.3. Система координат задачи.

где $Re = \frac{wD}{\nu_{ж}}$; $w = w_i - w_{ж}$ - относительная скорость; D - диаметр среза

парового канала; $w_i = \frac{\left(\varepsilon_{0п} + \frac{\dot{G}_п}{2F}\right)w_{п0} + \left(\varepsilon_{0ж} - \frac{\dot{G}_п}{2F}\right)w_{ж0}}{\varepsilon_{0п} + \varepsilon_{0ж}}$ - приведенная скорость;

$F = \pi D^2/4$; $\dot{G}_п$ - расход пара; $\varepsilon_{0п} = \frac{\xi}{2} \rho_{п0} (w_{п0} - w_i)$; $\varepsilon_{0ж} = \frac{\xi}{2} \rho_{ж0} (w_{ж0} - w_i)$; ξ - коэффициент трения.

Зная средний коэффициент теплоотдачи от пара к жидкости, можно определить длину конуса конденсации. В [38] отмечается, что при конденсации струи пара в объеме недогретой жидкости, граница раздела фаз является неустойчивой. В ходе этого нестационарного процесса с границы конденсации периодически срываются паровые объемы, формирующие второй конус с пузырьковой структурой. Скорость схлопывания пузырька пара предлагается определять по формуле

$$\dot{R} = \frac{dR_{п}}{d\tau} = \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{\rho_{п}\tilde{r}}, \quad (15.6)$$

где \tilde{r} - удельная теплота парообразования, $Nu = \frac{2\bar{\alpha}R_{п}}{\lambda_{ж}} = 0,37 \left(\frac{2R_{п}w}{\nu_{ж}}\right)^{0,6}$;

w - скорость движения пузырька.

В заключение краткого обзора состояния вопроса можно сделать вывод, что явление конденсации паровой струи в спутном потоке недогретой до температуры насыщения жидкости изучено недостаточно.

Ниже приводятся результаты исследований, проведенных аспирантом А.С. Анисимовым под руководством доц. В.А. Барилевича, краткое изложение которых представлено в [39].

Исследования проводились на экспериментальной установке, предельные параметры смешивавшихся сред сведены в таблицу:

Параметр	p_{max}	p_{min}	T_{max}	T_{min}	\dot{G}_{max}	\dot{G}_{min}
	МПа		К		кг/с	
Пар	0,8	0,105	478	444	0,085	0,01
Вода	0,3	0,102	375	275	1,300	0,20

По данным опытов устанавливались зависимости безразмерных параметров $\frac{T_i}{T_2}$; $\frac{p_i}{p_2}$; $\frac{p_i^*}{p_2^*}$ от $\frac{l_i}{d_{лср}}$ и $\frac{r_i}{d_{кс}}$, где T_i и p_i - значения температуры и давления в исследуемой точке камеры смешения, l_i - значение продольной координаты, $d_{кс}$ - диаметр камеры смешения. Кроме того, определялись зависимости длины зоны смешения $l_{зс}$ и угла конуса конденсации α от давления воды p_2 , температуры воды T_2 и давления пара p_1 на входе в паровой насадок.

Основным элементом установки являлась камера смешения, выполненная из органического стекла. Внутренняя поверхность камеры

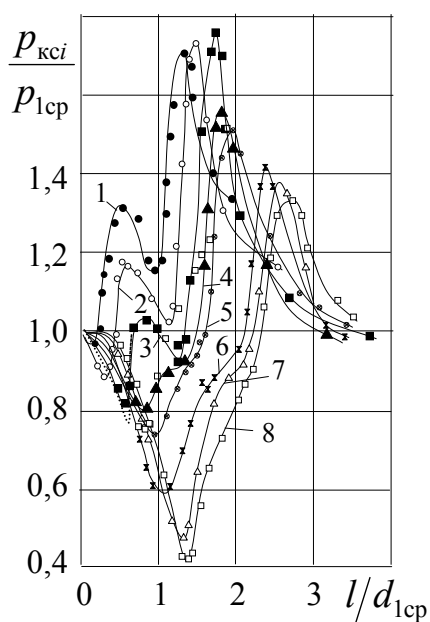


Рис.15.4. Распределение статического давления вдоль продольной оси камеры смешения.

шагом 0,5...1,0 мм. У границы первого парового конуса, где имели место значительные градиенты параметров, шаг в радиальном направлении составлял 0,1 мм.

При теоретическом анализе конденсирующейся струи, как отмечалось выше, считалось, что давление в паровой струе остается постоянным. Однако опыты показали, что вдоль продольной оси паровой конденсирующейся струи оно изменяется весьма существенно.

На рис.15.4 представлено распределение статического давления вдоль продольной оси камеры смешения при различных расходах пара, полученное с помощью зонда-протяжки. Наблюдалось два характерных режима, представленные кривыми 1–3 (расходы пара 16, 18.5 и 20.8 г/с) и 4–8 (расходы пара: 25.6, 29.7, 37.5, 42.8 и 45 г/с соответственно).

Рассмотрим один из режимов со следующими параметрами (кривая 3):

$\dot{G}_п$	p_{1cp}	T_{1cp}	ρ_{1cp}	i_{1cp}	a_{1cp}	w_{1cp}	M	X	p_2	t_2
г/с	МПа	К	кг/м ³	кДж/кг	м/с	м/с			МПа	°С
20,8	0,1	372,8	0,59	2675,7	438,8	450,0	1,026	1	0,1	5,5

При выходе парового потока из насадки $dp/dx < 0$, что приводит к ускорению паровой струи. На расстоянии $l/d_{1cp} \approx 0,5$ градиент давления становится равным нулю, а затем положительным. В месте, где статическое давление имеет второй экстремум, визуальные наблюдения показывают, что произошло завершение конденсации центральной струи пара (вершина первого конуса конденсации). Срыв паровых объемов с неустойчивой поверхности первого конуса порождает второй конус с пузырьковой структурой, в котором происходит как ускорение, так и торможение потока.

диаметром 40 мм и длиной 318 мм и плоская поверхность, обращенная к исследователю, были отполированы, что позволяло проводить визуальные наблюдения и фотографирование процесса конденсации. Подвод пара в камеру смешения осуществлялся через цилиндрические насадки ($d_{1cp}=10; 12,5; 15; 17,5$ и 20 мм). Измерение полного давления p_i^* в потоке осуществлялось методом "пролива", суть которого заключается в уравнивании полного давления исследуемого потока встречным потоком жидкости, вытекающей из трубки полного напора под известным давлением. Для измерения температуры применялись хромель-копелевые термопары с диаметром электродов 0,2 мм. Перемещение зондов осуществлялось с

Протяженность второго конуса определяет положение абсолютного максимума давления, здесь происходит схлопывание основной массы паровых пузырьков. При большом расходе пара через насадку ($\dot{G}_n = 45$ г/с, кривая 8) имеет место вырождение первого конуса. В этом случае значительное взаимодействие между потоками приводит к разрушению парового потока, выходящего из насадка, с образованием пузырьковой структуры.

Для расчета параметров потока в первом паровом конусе, рассмотрена модель процесса в виде течения пара в коническом насадке с бесконечно большим числом боковых отверстий. Согласно модели, истечение пара из отверстий происходит под углом β к продольной оси (см. рис.15.5). При $\gamma=0$ поток конденсирующегося пара направлен по нормали к боковой поверхности конуса.

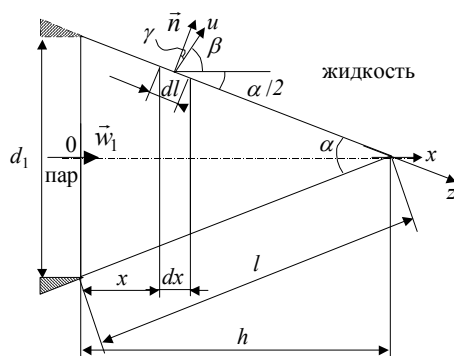


Рис. 15.5

Исходные уравнения, описывающие процессы внутри парового конуса, имеют вид:

$$\begin{aligned} d(\dot{G}_n w_x) &= u \cos \beta d\dot{G}_n - F dp, \\ d(\dot{G}_n i_n^*) &= \left(i_n + \frac{u^2}{2} \right) d\dot{G}_n, \\ d\dot{G}_n &= -\chi u \rho_n dS \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right), \quad (15.7) \\ \frac{d\dot{G}_n}{\dot{G}_n} &= \frac{dw_x}{w_x} + \frac{d\rho_n}{\rho_n} + \frac{dF_n}{F_n}, \end{aligned}$$

$$F_n = \frac{\pi}{4} \left(d_1 - \frac{d_1}{h} x \right)^2, \quad i' = f(p), \quad i'' = f(p), \quad v' = \varphi(p), \quad v'' = \psi(p),$$

где u – скорость потока элементарной массы пара, конденсирующегося на границе раздела фаз; χ – коэффициент, характеризующий интенсивность уноса массы пара; dS – элемент поверхности парового конуса.

Система уравнений аналитически разрешалась относительно производных $\frac{dw_x}{dx}$, $\frac{dp}{dx}$, $\frac{d\rho_n}{dx}$, $\frac{di_n}{dx}$, численное решение производилось методом Рунге-Кутты.

Результаты расчета для первого режима при $\chi=0,65$ представлены на рис.15.4 (пунктирная кривая) и рис.15.6. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных кривых достигнуто при $\chi=0,52 \dots 0,7$.

Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности первого парового конуса

$$\bar{\alpha} = \frac{\dot{G}_n r}{S \Delta T}, \quad (15.8)$$

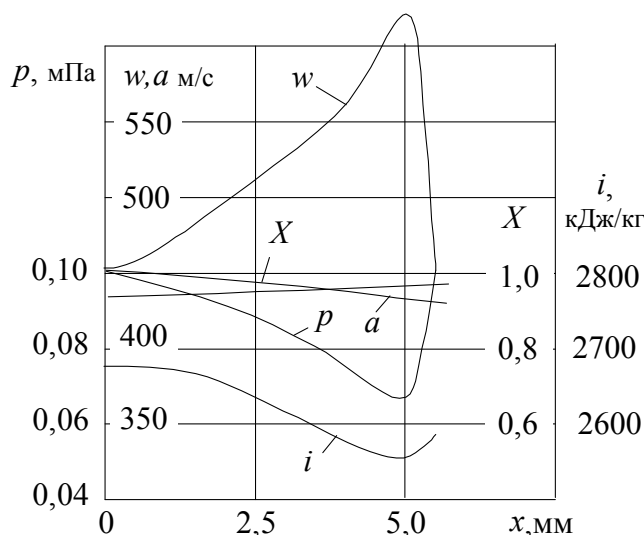


Рис. 15.6. Распределение параметров потока вдоль продольной оси парового конуса.

где $S = \frac{\pi d_1 l}{2}$ - боковая поверхность конуса; ΔT - средний температурный напор между паром и спутным потоком жидкости.

Выполнив преобразования правой части (15.8), получим

$$\bar{\alpha} = \frac{w_1 d_1 \rho_{\text{пл}} r}{2 l \Delta T}. \quad (15.9)$$

Критерий Нуссельта с учетом (15.9) можно представить в виде

$$\text{Nu} = \frac{\bar{\alpha} l}{\lambda_{\text{пл}}} = \frac{w_1 d_1 \rho_{\text{пл}} r}{2 \Delta T \lambda_{\text{пл}}} = \frac{1}{2} \frac{w_1 d_1}{v_{\text{пл}}} \frac{r}{c_{\text{рж}} \Delta T} \frac{\mu_{\text{пл}} c_{\text{рп}} c_{\text{рж}}}{\lambda_{\text{пл}} c_{\text{рп}}} = \frac{1}{2} \text{Re}_{d_1} K \text{Pr}_{\text{пл}} \frac{c_{\text{рж}}}{c_{\text{рп}}}. \quad (15.10)$$

Запишем уравнение теплоотдачи в критериальной форме

$$\text{Nu} = C \text{Re}_l^m K^n \text{Pr}_{\text{пл}}^q, \quad (15.11)$$

где $\text{Re}_l = \frac{(w_{\text{пл}} - w_{\text{жз}}) l}{v_{\text{пл}}} \approx \frac{w_{\text{пл}} l}{v_{\text{пл}}} = \frac{w_1 h}{v_{\text{пл}}} = \frac{w_1 d_1}{v_{\text{пл}}} \frac{h}{d_1} = \text{Re}_d \frac{h}{d_1}$ (считаем, что $w_{\text{пл}} \gg w_{\text{жз}}$).

Приравнявая (15.10) и (15.11), получим формулу для определения безразмерной высоты первого конуса конденсации

$$\bar{h} = \frac{h}{d_1} = \left(\frac{1}{2C} \text{Re}_d^{1-m} K^{1-n} \text{Pr}_{\text{пл}}^{1-q} \frac{c_{\text{рж}}}{c_{\text{рп}}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (15.12)$$

Определив высоту конуса, найдем средний коэффициент теплоотдачи

$$\bar{\alpha} = \frac{w_1 d_1 r \rho_{\text{пл}} \cos(\alpha/2)}{2 \Delta T h} = \frac{2 \dot{G}_{\text{пл}} r \cos(\alpha/2)}{d_1 h \pi \Delta T}. \quad (15.13)$$

В [39] в результате обработки опытных данных получены следующие критериальные уравнения

$$\bar{h}_1 = \frac{h}{d_1} = \left(0,352 \cdot 10^{-2} \text{Re}_d^{0,4} K^{0,08} \text{Pr}_{\text{пл}} \frac{c_{\text{рж}}}{c_{\text{рп}}} \right)^{1,67} \quad \text{при } \text{Re}_l = 10^5 \dots 3,5 \cdot 10^5, \quad (15.14)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{h}{d_1} = \left(1,55 \cdot 10^{-4} \text{Re}_d^{0,64} K^{0,08} \text{Pr}_{\text{пл}} \frac{c_{\text{рж}}}{c_{\text{рп}}} \right)^{2,78} \quad \text{при } \text{Re}_l = 3,5 \cdot 10^5 \dots 10^6. \quad (15.15)$$

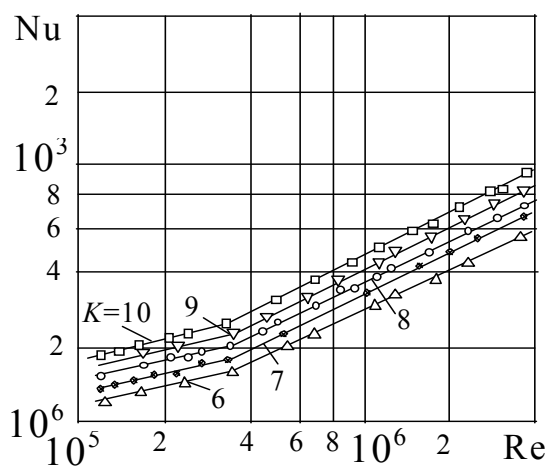


Рис.15.7. Зависимость $Nu=f(Re)$ при различных K .

Как отмечалось выше, система уравнений (15.7) разрешалась относительно производных dw_x/dx , dp/dx, а численное решение производилось методом Рунге-Кутты. Получим уравнения, позволяющие определить изменение физических величин в первом паровом конусе и в спутном потоке холодной воды (см. рис. 15.9).

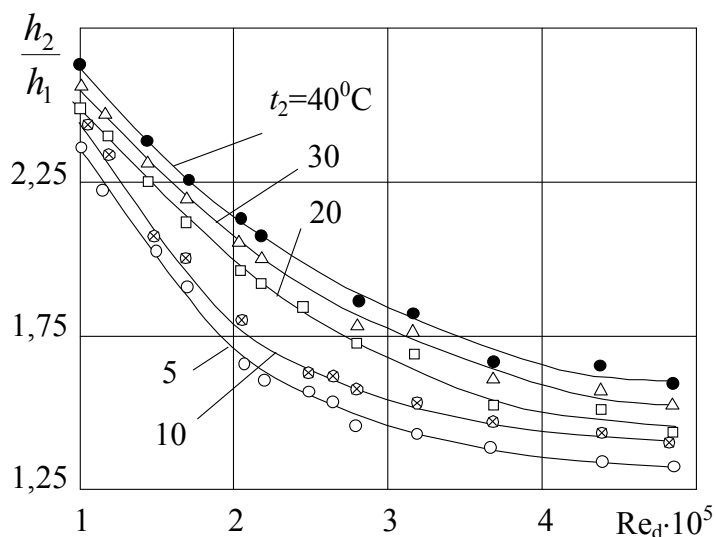


Рис.15.8. Зависимость $h_2/h_1=f(Re_d, t_2)$

Уравнение сплошности с учетом переменной массы запишем в виде:

$$d(\rho_{\Pi} F_{\Pi} w_{\Pi}) = -j \pi D dx' = -j dS, \quad (15.16)$$

где $dS = \frac{\pi d}{\cos(\beta/2)} dx - tg(\beta/2) dx^2$ - элементарная боковая поверхность конуса;

$j = \kappa \frac{\bar{\alpha} \Delta T}{r}$ - плотность потока массы конденсирующегося пара;

$\bar{\alpha} = \frac{2 \dot{G}_r \cos(\beta/2)}{d_1 h \pi \Delta T}$; κ - коэффициент, характеризующий интенсивность уноса

Графики зависимости $Nu=f(Re_l)$ в логарифмических координатах при различных значениях K представлены на рис.15.7. Формулы (15.14), (15.15) аппроксимируют опытные данные с погрешностью, не превышающей 5%.

Высоту второго (условного) конуса конденсации h_2 имеющего жидкостно-пузырьковую структуру можно определить из графиков, приведенных на рис.15.8. Протяженность второго конуса определяет длину камеры смешения.

массы; $\cos(\beta/2) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d_1}{2h}\right)^2 + 1}}$; d_1 - диаметр выходного среза парового насадка;

$h = \bar{h}d_1$ - высота первого парового конуса, определяемая из критериальных уравнений (15.14) или (15.15); $\operatorname{tg}(\beta/2) = \sqrt{\frac{1}{\cos^2(\beta/2)} - 1}$; $\cos \gamma = \cos(90 - \beta/2)$.

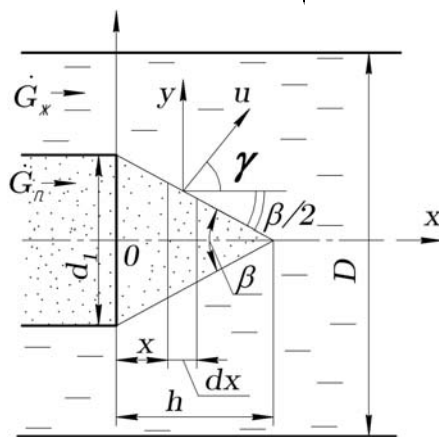


Рис.15.9

После дифференцирования левой части уравнения (15.16) с учетом того, что $a^2 = dp/d\rho$, получим:

$$\frac{dw_{\Pi}}{dx} = \kappa \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{r\rho_{\Pi}F_{\Pi}} \frac{dS}{dx} - \frac{w_{\Pi}}{F_{\Pi}} \frac{dF_{\Pi}}{dx} - \frac{M_{\Pi}^2}{\rho_{\Pi}w_{\Pi}} \frac{dp}{dx}, \quad (15.17)$$

где $\frac{dF_{\Pi}}{dx} = -\frac{\pi d_1}{2h} \left(d_1 - \frac{d_1 x}{h} \right)$; $d = (h-x) \frac{d_1}{h}$ - текущий диаметр парового конуса.

Из уравнения потока количества движения

$$d(\dot{G}_{\Pi} w_{\Pi}) = -u \cos \gamma d\dot{G}_{\Pi} - F_{\Pi} dp, \quad (15.18)$$

где $u = \kappa \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{\rho_{\Pi}r}$ - скорость потока конденсирующего пара, перпендикулярная боковой поверхности конуса, можно получить:

$$\frac{dw_{\Pi}}{dx} = -\frac{(u \cos \gamma + w_{\Pi})}{\dot{G}_{\Pi}} \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} - \frac{1}{\rho_{\Pi}w_{\Pi}} \frac{dp}{dx}, \quad (15.19)$$

где $\frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} = \kappa \frac{\bar{\alpha}\Delta T}{r} \frac{dS}{dx}$. Приравняв уравнения (15.17) и (15.19), найдем градиент статического давления вдоль парового конуса

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\rho_{\Pi}w_{\Pi}}{M^2 - 1} \left[\left(\frac{(u \cos \gamma + w_{\Pi})}{\dot{G}_{\Pi}} + \frac{1}{\rho_{\Pi}F_{\Pi}} \right) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} - \frac{w_{\Pi}}{F_{\Pi}} \frac{dF_{\Pi}}{dx} \right]. \quad (15.20)$$

Определив dp/dx по формулам (15.17) или (15.19), найдем dw_{Π}/dx . Зная текущее давление, по эмпирическим формулам определим температуру насыщения и плотность сухого насыщенного пара в конусе

$$T_{\Pi} = 5,677 p^{0,25} + 273, \quad \rho_{\Pi} = 1,213 \cdot 10^{-5} p^{0,9375}.$$

Степень сухости, плотность влажного пара и термодинамическую скорость звука в равновесном влажном паре найдем по формулам:

$$x_{\Pi} = \frac{T_{\Pi}}{r} \left[c_{pl}(T_{\Pi}) \ln \left(\frac{T_{\Pi}}{T_{\Pi}} \right) + \left(\frac{rx_{\Pi}}{T_{\Pi}} \right) \right], \quad \rho_{\text{см}} = \frac{\rho_l(T_{\Pi}) \rho_{\Pi}}{(\rho_{\Pi} + x_{\Pi}(\rho_l(T_{\Pi}) - \rho_{\Pi}))}, \quad a = \frac{v_{\text{см}} r}{(v'' - v')(c_{v,\text{см}} T_{\Pi})^{0,5}}$$

где $v_{\text{см}} = \frac{1}{\rho_{\text{см}}}$; $c_{v,\text{см}} = (1 - x_{\Pi})c_v' + c_v'' x_{\Pi}$ - удельная изохорная теплоемкость влажного пара со стороны двухфазной области в конусе; c_{pl} - удельная изобарная теплоемкость воды; $M = \frac{w_{\Pi}}{a}$.

Для спутного потока холодной воды можно написать:

$$\frac{dw_l}{dx} = \frac{1}{\dot{G}_l} \left[(u \cos \gamma - w_l) \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} - F_l \frac{dp}{dx} - \tau_w \pi D \right], \quad (15.21)$$

$$\frac{dT_l}{dx} = \left[\frac{(i_{\Pi}^* - i_l^*)}{\dot{G}_l} \frac{d\dot{G}_n}{dx} - w_l \frac{dw_l}{dx} \right] \frac{1}{c_{pl}}. \quad (15.22)$$

В такой постановке задачи считалось, что в камере смешения поперек потока выполняется условие $dp/dR = 0$, однако опыты показывают, что оно не выполняется, то есть в камере смешения имеет место как тепловая, так и механическая неравновесность потока. В этом случае из уравнения сплошности для потока воды

$$\rho_l d(w_l F_l) = j dS \quad (15.23)$$

можно получить

$$\frac{dw_l}{dx} = \frac{1}{F_l} \left(\frac{j}{\rho_l} \frac{dS}{dx} - w_l \frac{dF_l}{dx} \right). \quad (15.24)$$

Подставляя (15.24) в (15.21), определим градиент статического давления вдоль спутного потока холодной воды:

$$\frac{dp_l}{dx} = \frac{(u \cos \gamma - w_l)}{F_l} \frac{d\dot{G}_{\Pi}}{dx} - \frac{\dot{G}_l}{F_l^2} \left(\frac{j}{\rho_l} \frac{dS}{dx} - w_l \frac{dF_l}{dx} \right) - \frac{\tau_w \pi D}{F_l}. \quad (15.25)$$

В расчетах касательные напряжения на границах пар – жидкость и жидкость – стенка не учитывались. В приложении № 6 приводится текст программы “CON_STREAM”.

В работе [39] при различных режимных параметрах получены опытные данные о характере изменения давления и температуры по радиусу и длине камеры смешения. Исследован факельный режим конденсации, когда струя пара приобретает бочкообразную форму. Размер "бочки" уменьшается с уменьшением расхода пара и температуры воды. Так, при $\dot{G}_{\Pi} = 13,2$ г/с и $t_2 = 27,9^{\circ}\text{C}$ протяженность "бочки" равнялась диаметру парового насадка (10 мм). Уменьшение расхода пара приводит к возникновению пульсационного режима. В этом случае скорость конденсации может стать больше скорости истечения пара из насадки, и фронт конденсации переместится внутрь насадка. По мере движения фронта конденсации вверх по потоку, скорость конденсации падает из-за уменьшения градиента температуры на поверхности конденсации. Когда скорость потока становится больше скорости конденсации, происходит выброс всей массы жидкости из

насадка. Этот процесс повторяется с определенной периодичностью и режим работы камеры смешения становится неустойчивым.

16. Охлаждение высокотемпературных поверхностей двухфазным потоком.

При создании энергетического оборудования, в котором в качестве рабочего тела используется высокотемпературный газ, возникает проблема защиты поверхностей от воздействия температуры. Традиционно для охлаждения деталей газовых турбин (в первую очередь, лопаточного аппарата) используется сжатый воздух после компрессора. Однако каждые 3% воздуха, отобранные для охлаждения, снижают КПД газотурбинной установки приблизительно на 1%. Из-за низкой удельной теплоемкости ($c_p=1003$ Дж/(кг·К)) требуются большие расходы охлаждающего воздуха. Так как удельная изобарная теплоемкость перегретого пара выше теплоемкости воздуха (при атмосферном давлении – в 2 раза), то возникла идея использовать пар для охлаждения газовой турбины с последующим использованием его в качестве рабочего тела в паровой турбине.

Такая комбинированная установка с высокотемпературной газовой турбиной была разработана в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ) совместно с Центральным котлотурбинным институтом (схема ЦКТИ-ЛПИ, авторы профессора И.И. Кириллов, В.А. Зысин, Л.В. Арсеньев, С.Я. Ошеров).

С целью интенсификации теплообмена предполагалось использовать увлажненные воздушные и паровые потоки вплоть до высоковлажного пара, образующегося в результате адиабатического расширения перегретой воды. Для реализации этой задачи необходимо было провести экспериментальные исследования, которые были выполнены аспирантами Л.В. Зысиным и В.А. Барилевичем под руководством профессора ЛПИ В.А. Зысина.

Обработка опытных данных по охлаждению радиатора (оребренная "ножка" между пером и замком) лопатки увлажненным воздушным потоком позволила Л.В. Зысину получить критериальное уравнение

$$Nu = \left[1 + C \left(\frac{F_{\text{ороб}}}{F_{\text{глад}}} \right)^{-1,1} \frac{q}{q_0} \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{возд}}} \right)^{0,27} \left(\frac{T_w}{T_{\text{возд}0}} \right)^{-4,65} \right] Nu_{\text{возд}},$$

которое справедливо как для единичного радиатора, так и для решетки радиаторов. Плотность теплового потока q в опытах не превышала $580 \cdot 10^3$

Вт/м², а влагосодержание $\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{возд}}} \leq 0,12$.

Рассмотрим процессы, имеющие место при движении двухфазного потока в обогреваемых каналах. При движении газок капельного потока можно выделить две характерные зоны. Во входной части канала, как правило, реализуется дисперсно-кольцевой режим, который после испарения жидкостной пленки переходит в дисперсный. На начальном участке, где

температура стенки невелика, двухфазный поток, контактируя с твердой поверхностью, образует жидкую пленку. Толщина пленки зависит как от концентрации жидкости в ядре потока, скорости несущего потока, так и от расположения смесителя относительно обогреваемого канала. При подводе теплоты к тонкой пленке, с ее поверхности происходит испарение жидкости. Элементарный отвод теплоты за счет испарения определяется удельной теплотой парообразования r и массой испарившейся жидкости: $rdG_{\text{вып}}$. В ядре потока будем иметь

$$dQ_{\text{п}} = [\alpha_{\text{п-к}} (T_{\text{п}} - T_{\text{к}}) + rj_{\text{п-к}}] \pi D_{\text{к}}^2 n_{\text{в}} F_{\text{кан}} dx.$$

Испарившаяся влага компенсируется выпадением жидкости из ядра потока. Анализ существующих работ показывает, что закон выпадения влаги из ядра потока еще недостаточно изучен. Б.С. Филиппович, исследуя течение воздушно-жидкостной смеси с малым объемным содержанием жидкой фазы, показал, что для изотермического потока $G_{\text{вып}} \approx W_{\text{п}}^{0,75} C_0^{0,74}$, где C_0 – концентрация влаги в ядре потока.

В неизотермическом потоке при дисперсно-кольцевом режиме выпадению капель на стенку препятствует паровой поток, идущий от испаряющейся пленки. В дисперсном режиме при значительной температуре стенки отвод теплоты каплями затрудняется паровой прослойкой, образующейся вокруг капли. С ростом тепловой нагрузки и температуры стенки возможно неравенство $G_{\text{исп}} > G_{\text{вып}}$. С этого момента начинаются утонение пленки и ее разрыв вдоль образующей канала из-за неравномерного нагрева по периметру, различий в смачиваемости участков поверхности, а также под действием сил поверхностного натяжения, стремящихся сократить поверхность пленки. Таким образом, в результате неравномерного испарения пленки возникает неустойчивый

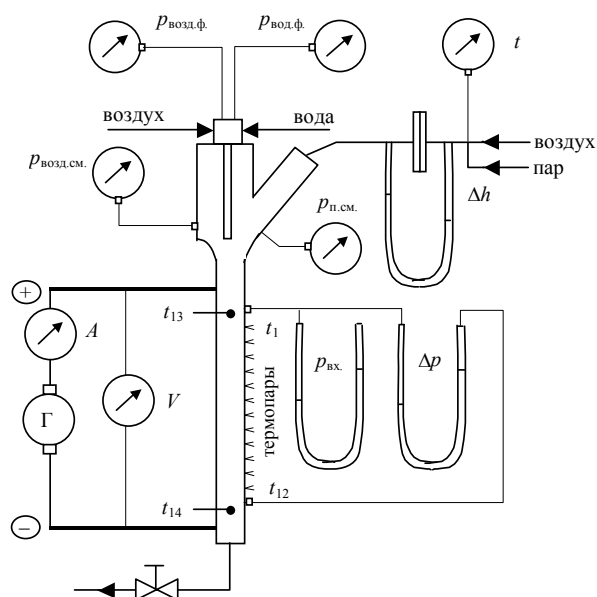


Рис. 16.1 Схема установки

по сравнению с газовым потоком.

"ручьевого" режим течения жидкой пленки. Перемещение жидкостных "жгутов" по периметру обогреваемой трубы приводит к периодическому изменению температуры в точках замера. В момент высыхания жгутов возрастает температура стенки и наступает дисперсный режим, сопровождающийся ухудшением теплоотдачи. Если дисперсный капельно-паровой поток сохраняется до конца канала, то температура ядра потока близка к температуре насыщения, что обеспечивает повышенный температурный напор

Экспериментальный стенд для исследования теплоотдачи в увлажненном воздушном потоке представлял собой вертикальную трубку из нержавеющей стали 1X18H9T с внутренним диаметром 20 мм и длиной от 600 до 1200 мм. Нагрев трубки осуществлялся низковольтным генератором АНГ-5000/2500. Максимальная плотность теплового потока составляла $4,5 \text{ кВт/м}^2$. Смеситель, расположенный в верхней части трубки, имел пневматическую форсунку. Температура поверхности трубки измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, статическое давление – образцовыми манометрами, расход воздуха – мерной диафрагмой. Принципиальная схема установки показана на рис. 16.1. До основных опытов были проведены измерения теплоотдачи на воздухе, подтвердившие формулу Михеева

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{возд}}}{\text{Pr}_w} \right)^{0,25} .$$

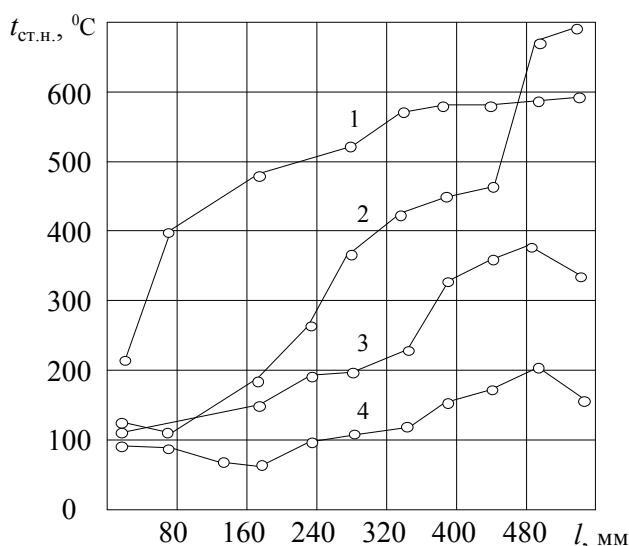


Рис. 16.2

- 1 - $\bar{G} = 0, q = 46 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2, \text{Re}_{\text{возд}} = 6,4 \cdot 10^4$;
- 2 - $\bar{G} = 0,087, q = 98 \cdot 10^3, \text{Re}_{\text{возд}} = 6,3 \cdot 10^4$;
- 3 - $\bar{G} = 0,089, q = 129 \cdot 10^3, \text{Re}_{\text{возд}} = 6,1 \cdot 10^4$;
- 4 - $\bar{G} = 0,13, q = 138 \cdot 10^3, \text{Re}_{\text{возд}} = 6,1 \cdot 10^4$;

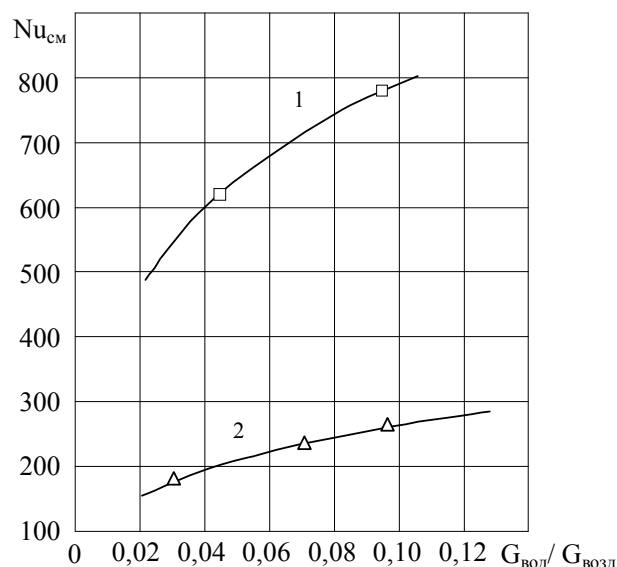


Рис. 16.3

- 1 - $T_w/T_{cm} = 1,2$; 2 - $T_w/T_{cm} = 1,7$

На рис. 16.2 показано изменение температуры наружной стенки трубки, обогреваемой постоянным электрическим током, при различных тепловых нагрузках q и разных степенях увлажнения потока $\bar{G} = G_{\text{вод}}/G_{\text{возд}}$. Можно выделить три характерных режима течения: дисперсно-кольцевой, когда по стенке течет пленка; предкризисный и кризисный, при котором имеет место резкое ухудшение теплоотдачи. Увеличение количества влаги в потоке приводит к "подавлению" кризисной зоны. Так, при наибольшей из исследованных степени увлажнения (кривая 4) максимальная температура стенки не превышала 200°C .

Зависимость $Nu_{\text{возд.см}} = f(\bar{G})$ при постоянном $Re_{\text{возд}} = 6,4 \cdot 10^4$ и различных температурных факторах $T_w/T_{\text{см}}$ представлена на рис. 16.3. В случае, когда большая часть поверхности занята жидкой пленкой (кривая 1 - $T_w/T_{\text{см}} = 1,2$), число Нуссельта больше, чем в режиме с температурным фактором 1,7. Значение $Nu_{\text{возд.см}}$ возрастает с увеличением влагосодержания в потоке. Обработка экспериментальных данных в логарифмических координатах показала, что $Nu_{\text{возд.см}} \sim \bar{G}^{0,29}$. Зависимость $Nu_{\text{возд.см}} = f(T_w/T_{\text{см}})$ носит гиперболический характер (рис. 16.4) и кривые распадаются по числу $Re_{\text{возд}}$. При больших значениях температурного фактора $Nu_{\text{возд.см}} \rightarrow Nu_{\text{возд}}$. При неизменных \bar{G} и $Re_{\text{возд}}$ с увеличением температурного фактора степень интенсификации теплообмена стремится к единице, т.е. жидкость, находящаяся в сфероидальном состоянии, не может снять большого количества теплоты. Обработка опытных данных по теплообмену в увлажненных воздушных потоках позволила получить критериальное уравнение (см. рис. 16.5)

$$Nu_{\text{возд.см}} = \frac{\bar{\alpha}d}{\lambda_{\text{п}}} = 0,27 \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{возд}}} \right)^{0,29} \left(\frac{T_{\text{см}}}{T_w} \right)^3 Re_{\text{возд}}^{0,8}, \quad (16.1)$$

где $Re_{\text{возд}} = w_{\text{возд}}d/\nu_{\text{возд}}$, d – внутренний диаметр трубки, $\nu_{\text{возд}}$ – кинематическая вязкость сухого воздуха на входе, $\bar{\lambda}_{\text{п}}$ – средний коэффициент теплопроводности пара, T_w и $T_{\text{см}}$ – средние температуры стенки и смеси.

В опытах \bar{G} изменялось от 4 до 13% , число $Re_{\text{возд}} = (6...16) \cdot 10^4$. Значение температурного фактора $\frac{T_w}{T_{\text{см}}}$ находилось в пределах 1,1...2.

Плотность теплового потока q изменялась от $47 \cdot 10^3$ до $150 \cdot 10^3$ Вт/м².

Рисунок 16.6 иллюстрирует неудовлетворительную организацию смешения парового и высоковлажного потоков, при которой в начале обогреваемой трубки образуется жидкостная пленка. На рис.16.7 представлены результаты измерений при более качественном смешении, достигаемом путем перемещения увлажняющего сопла вниз по потоку.

Исследование охлаждения увлажненным паровым потоком позволило получить критериальное уравнение

$$Nu_{\text{п.см}} = \frac{\bar{\alpha}d}{\lambda_{\text{п}}} = 0,75 \cdot 10^{-5} \left(\frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{п}}} \right)^{0,43} \left(\frac{\Delta t}{T_w} \right)^{-1} Re_{\text{п0}}^{1,45}, \quad (16.2)$$

которое справедливо в диапазоне параметров $0,15 \leq \bar{G} \leq 1,1$; $0,1 \leq \Delta t/T_w \leq 0,5$; $190 \cdot 10^3 \leq Re_{\text{п0}} \leq 430 \cdot 10^3$; $50 \cdot 10^3 \leq q \leq 1,5 \cdot 10^6$ Вт/м², $\Delta t = t_w - t_{\text{см}}$, $Re_{\text{п0}} = w_{\text{п0}}d/\nu_{\text{п0}}$.

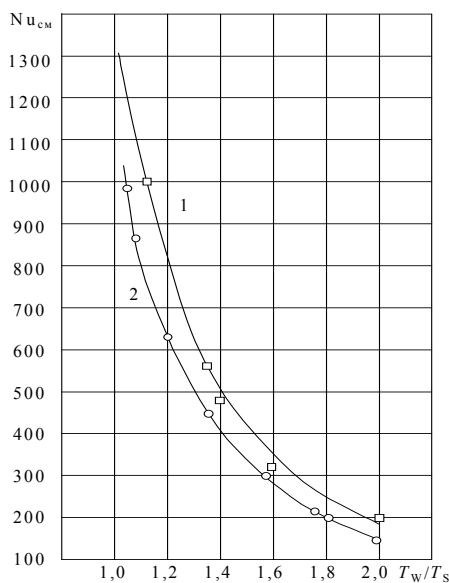


Рис. 16.4
1 - $Re_{\text{возд}}=11,5 \cdot 10^4$; 2 - $9,1 \cdot 10^4$

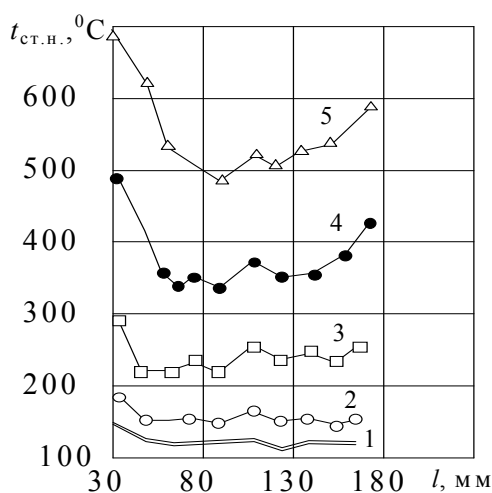


Рис. 16.7

$$1 - \bar{G} = \frac{G_{\text{ж}}}{G_{\text{возд}}} = 0,144; q = 47,5 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 26,3 \cdot 10^4$$

$$2 - \bar{G} = 0,134; q = 155 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 26,3 \cdot 10^4$$

$$3 - \bar{G} = 0,12; q = 316 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 26,3 \cdot 10^4$$

$$4 - \bar{G} = 0,137; q = 482 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 23,2 \cdot 10^4$$

$$5 - \bar{G} = 0,163; q = 676 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 19,5 \cdot 10^4$$

Отклонение опытных точек от уравнения представлено на рис. 16.8. Большая величина показателя степени при $Re_{\text{п0}}$ объясняется тем, что критерий Рейнольдса определялся по входным параметрам сухого насыщенного пара. Действительная же скорость в обогреваемом канале была выше из-за испарения влаги.

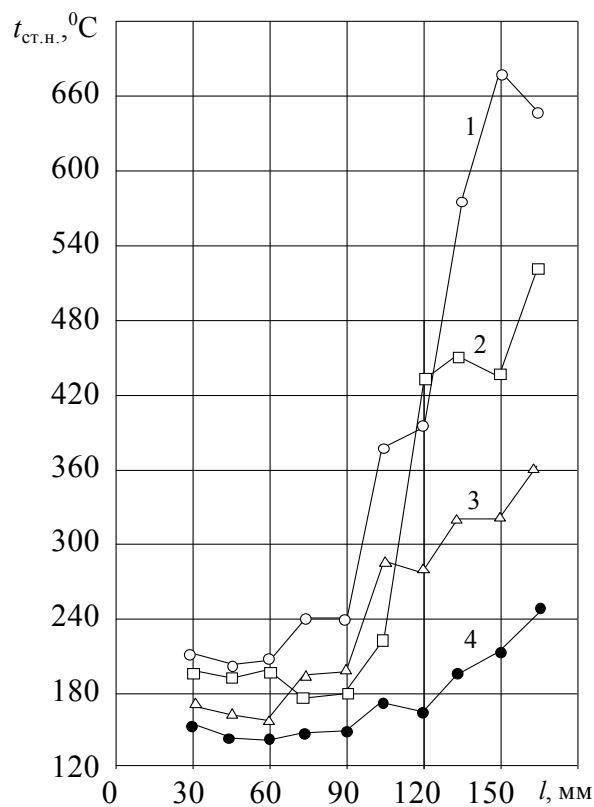


Рис. 16.6

Изменение температуры стенки вдоль вертикальной обогреваемой трубы в зависимости от относительного расхода воды, вводимой в паровой поток при наличии жидкой пленки на начальном участке.

$$1 - \bar{G} = 0,917; q = 747 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 21,6 \cdot 10^4$$

$$2 - \bar{G} = 1,01; q = 768 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 17,6 \cdot 10^4$$

$$3 - \bar{G} = 0,895; q = 593 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 22,1 \cdot 10^4$$

$$4 - \bar{G} = 0,983; q = 440 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2; Re_{\text{п0}} = 20,2 \cdot 10^4$$

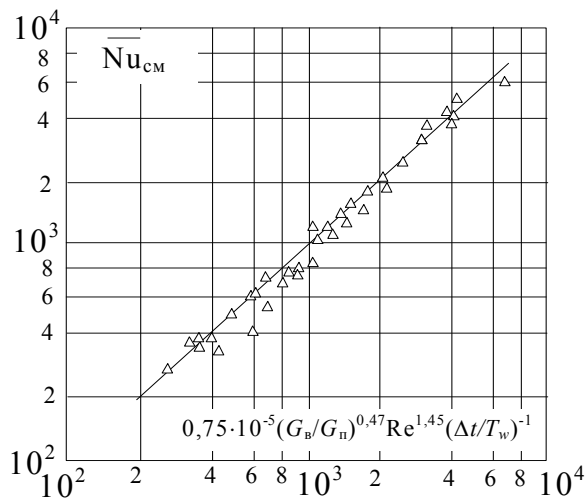


Рис. 16.8

интенсивность теплоотдачи от высоко-нагретых поверхностей.

Серия опытов, проведенных с высоко-влажным паром со степенью сухости 0,04...0,06 показала, что при $q=2,1 \cdot 10^6$ Вт/м² температура стенки не превышала 300⁰С и оставалась практически постоянной вдоль трубки.

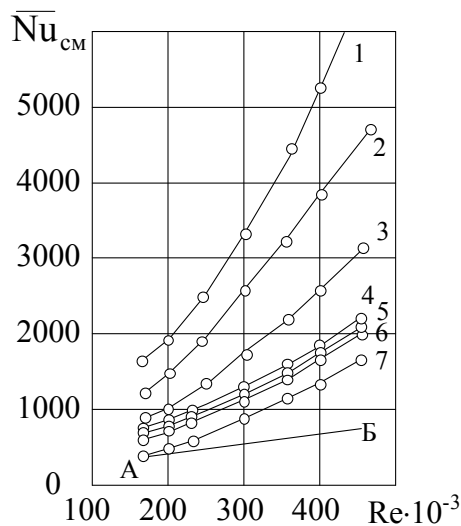


Рис. 16.9

Зависимость $Nu = f(Re_{п0})$ при различных значениях \bar{G} и $\Delta t / T_w$.

- 1,3,6- $\bar{G} = 1,1$; $\Delta t / T_w = 0,2; 0,4; 0,6$
- 2,4,7- $\bar{G} = 0,6$; $\Delta t / T_w = 0,2; 0,4; 0,6$
- 5- $\bar{G} = 0,12$; $\Delta t / T_w = 0,2$.

Рис.16.9 дает возможность сравнить теплоотдачу в увлажненном паровом потоке и в случае использования в качестве охлаждающего агента сухого насыщенного пара ($\bar{G} = 0$, кривая А-В) в зависимости от Re . Так, для случая: $Re_{п0} = 40 \cdot 10^4$, $\bar{G} = 1,1$; $\Delta t / T_w = 0,2$; $\alpha_{cm} / \alpha_n = 7,44$; при $\Delta t / T_w = 0,6$; $\alpha_{cm} / \alpha_n = 2,48$.

Как видим, применение увлажненных паровых потоков значительно увеличивает

Недостаточное количество опытных данных не позволило дать расчетных рекомендаций, однако качественный результат экспериментов свидетельствует о высокой эффективности применения в качестве охлаждающего агента высоко-влажного пара, образующегося при адиабатическом расширении перегретой воды.

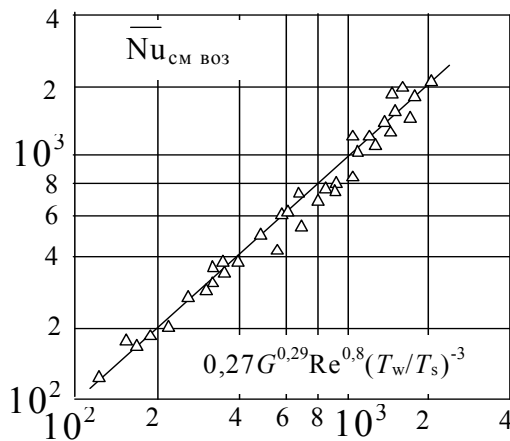


Рис. 16.5

Приложение №1

Программы, представленные в приложениях, предназначены для решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, полученных в пособии. В связи с этим программы имеют общую структуру:

- чтение исходных данных из файла данных (необходимые константы, шаг интегрирования, значения искомых величин в начальном сечении канала);
- расчет правых частей уравнений системы (массив C(i));
- четырехкратное обращение на каждом шаге по длине канала к подпрограмме RKM решения системы методом Рунге-Кутты (значения искомых величин записываются в рабочий массив B(i));
- вывод результатов через заданное число шагов в файл результатов (REZ*.DAT).

Метод Рунге-Кутты

Метод Рунге-Кутты относится к классу одношаговых методов, в которых для нахождения значения искомой функции используется информация о решении на предыдущем шаге [25].

Пусть нужно решить уравнение вида $y' = f(x, y)$. Решение, т.е. зависимость вида $y = F(x)$ находится в данном методе определением приращения функции Δy при увеличении аргумента на Δx , если известно значение $y(x)$

$$\Delta y = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) + o(x^5),$$

где $k_1 = h \cdot f(x, y); \quad k_2 = h \cdot f\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{k_1}{2}\right); \quad k_3 = h \cdot f\left(x + \frac{h}{2}, y + \frac{k_2}{2}\right);$

$$k_4 = h \cdot f(x + h, y + k_3); \quad h = \Delta x.$$

Тогда $y(x + \Delta x) = y(x) + \Delta y$.

При однократном использовании такого метода значения функции f (правой части дифференциального уравнения) необходимо вычислять четыре раза, поэтому подпрограмма RKM имеет четыре входа (FIRST ENTRY ... FOURTH ENTRY) для вычисления $k_1 \dots k_4$ соответственно. В подпрограмму вводятся фактические значения переменных на предыдущем шаге (массив B) и значения правых частей каждого из системы обыкновенных дифференциальных уравнений (массив C). Рассчитанные на текущем шаге новые значения переменных записываются в массив B и передаются в головную программу.

В качестве примера вычислений по методу Рунге-Кутты приведем решение уравнения

$\frac{dy}{dx} = x + y$ [25] на отрезке $0 \leq x \leq 0,5$ при граничных условиях: $x(0)=0$, $y(0)=1$, шаг интегрирования $\Delta x=h=0,1$.

Покажем, как вычисляется значение искомой функции y на первом шаге.

$k_1^0 = h \cdot f(x_0, y_0) = 0,1 \cdot (0 + 1) = 0,1$; где $f(x_0, y_0)$ - правая часть дифференциального уравнения при $x=x_0$ и $y=y_0$, то есть $f(x_0, y_0) = x_0 + y_0 = 0 + 1 = 1$;

$$k_2^0 = h \cdot f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_1^0}{2}\right) = h \cdot \left[\left(x_0 + \frac{h}{2}\right) + \left(y_0 + \frac{k_1^0}{2}\right) \right] =$$

$$0,1[(0 + 0,05) + (1 + 0,05)] = 0,11;$$

$$k_3^0 = h \cdot f\left(x_0 + \frac{h}{2}, y_0 + \frac{k_2^0}{2}\right) = 0,1 \left[(0 + 0,05) + \left(1 + \frac{0,11}{2}\right) \right] = 0,1105;$$

$$k_4^0 = h \cdot f(x_0 + h, y_0 + k_3^0) = 0,1[(0 + 0,1) + (1 + 0,1105)] = 0,12105;$$

$$\Delta y_0 = \frac{1}{6}(k_1^0 + 2k_2^0 + 2k_3^0 + k_4^0) = \frac{1}{6}(0,1 + 2 \cdot 0,11 + 2 \cdot 0,1105 + 0,12105) = 0,11034.$$

Таким образом, значение искомой функции на первом шаге равно:

$$y_1 = y_0 + \Delta y_0 = 1,11034.$$

На следующем шаге вместо x_0 и y_0 берутся значения $x_1=x_0+\Delta x$ и y_1 .

LAV1A

Программа LAV1A позволяет решить систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих движение идеального газа в сопле Лавая. Исходными данными являются значения параметров газа и диаметр канала в начальном сечении сопла, длина сопла, шаг по продольной координате (файл LAV1A.DAT). Результаты расчета выводятся в файл REZL1A.DAT.

Идентификаторы программы

N- число дифференциальных уравнений системы

DX- шаг интегрирования, Δx , м

Z- длина сопла, канала, м

P,W,T,RO- значения давления, скорости, температуры и плотности газа в текущем сечении сопла

DS,FS-текущие значения диаметра и площади поперечного сечения сопла, м

PI- число “пи”

G0-расход газа через сопло, кг/с
 PSR-заданное давление на срезе сопла, Па
 ADG- показатель изоэнтропы, k
 AMG- молекулярный масса газа, μ_r , кг/кмоль
 UGC-универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(кмоль К)
 KK- интервал для выдачи результатов расчета (через каждые KK шагов)
 SA- адиабатическая скорость звука в газе
 MAX-число Маха
 PSTAR,ROSTAR,TSTAR- параметры торможения p^* , ρ^* , T^*
 PKR,ROKR,TKR- параметры в критическом сечении $p_{кр}$, $\rho_{кр}$, $T_{кр}$
 GKR-критический расход, \dot{G}_{KP} .
 PA,WA- аналитические текущие значения давления и скорости потока
 DW - разница между численным и аналитическим значениями скорости потока
 EPS-относительная погрешность численного определения скорости по сравнению с аналитическим.

Идентификаторы с нулем обозначают задаваемые или рассчитываемые значения переменных во входном сечении канала.

FORTRAN:

```

1   PROGRAM LAV1A
2   C   Изоэнтропийное расширение идеального
3   C   газа в сопле Лавалья
4   C   (тестовая задача - показывает погрешность
5   C   численного метода).
6   C
7   REAL MAX0
8   DIMENSION B(10),C(10)
9   OPEN (2,FILE='LAV1A.DAT')
10  OPEN (6,FILE='REZL1A.DAT')
11  READ(2,*) N,DX,Z,P0,W0,T0,PI
12  READ(2,*) G0,PSR,ADK,AMG,UGC,KK
13  RO0=P0*AMG/T0/UGC
14  FN0=G0/W0/RO0
15  DN0=(4.*FN0/PI)**0.5
16  SA0=(ADK*UGC*T0/AMG)**0.5
17  MAX0=W0/SA0
18  TSTAR=T0*(1.+(ADK-1.)*MAX0**2/2.)
19  TKR=2.*TSTAR/(ADK+1.)
20  AKR=(ADK*UGC*TKR/AMG)**0.5
21  PSTAR=P0*(TSTAR/T0)**(ADK/(ADK-1.))
22  ROSTAR=RO0*(TSTAR/T0)**(1./(ADK-1.))
  
```



```

23   PKR=PSTAR*(TKR/TSTAR)**(ADK/(ADK-1.))
24   ROKR=ROSTAR*(TKR/TSTAR)**(1./(ADK-1.))
25   N=4
26   W=W0
27   P=P0
28   T=T0
29   RO=RO0
30   IS=0
31   B(1)=P0
32   B(2)=W0
33   B(3)=T0
34   B(4)=RO0
35   K=0
36   X=0
37 120  X=X+DX
38     K=K+1
39     DO 110 LL=1,4
40     C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*X/(Z**2*((P0/PSR-1.)
41 & *(X/Z)**2+1.))**2)
42     C(2)=-C(1)/W/RO
43     C(3)=- (ADK-1.)*AMG*W*C(2)/ADK/UGC
44     C(4)=RO*C(1)/P-RO*C(3)/T
45     CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
46     P=B(1)
47     W=B(2)
48     T=B(3)
49 110  RO=B(4)
50     PRINT*, ' X=',X, ' P=',P, ' W=',W
51     FN=G0/W/RO
52     DN=(4.*FN/PI)**0.5
53     PA=P0/((P0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
54     WA=(2.*ADK*UGC*TSTAR*(1.-(PA/PSTAR)**((ADK-
1.)/ADK))/
55     & ((ADK-1.)*AMG)**0.5
56     DW=WA-W
57     EPS=DW*100./WA
58     IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) ' X=',X, ' P=',P, ' W=',W, ' T=',T
59     IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) ' RO=',RO, ' DN=',DN, ' DW=',DW, '
EPS=',EPS
60     IF(K.EQ.KK)K=0
61     IF(X.LT.Z)GOTO 120
62     STOP

```

```

63     END
64     SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
65     DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
66     IS=IS+1
67     GOTO(10,30,60,80),IS
68 10   E=A
69     DO 20 I=1,N
70     F(I)=B(I)
71     G(4*I-3)=C(I)*DX
72 20   B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
73     GOTO 50
74 30   DO 40 I=1,N
75     G(4*I-2)=C(I)*DX
76 40   B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
77 50   A=E+DX/2.
78     GOTO 100
79 60   DO 70 I=1,N
80     G(4*I-1)=C(I)*DX
81 70   B(I)=F(I)+G(4*I-1)
82     A=E+DX
83     GOTO 100
84 80   DO 90 I=1,N
85     G(4*I)=C(I)*DX
86     B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
87 90   B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
88     IS=0
89 100  RETURN
90     END

```

ПАСКАЛЬ:

PROGRAM LAV1A;

{ Изоэнтروпийное расширение идеального газа в сопле Лавалья
(тестовая задача - показывает погрешность
численного метода). }

type VEC=array [1..10] of real;

var

LL,IS,N,I,KK,K : integer;

MAX0,E,A,X,DX,Z,P0,W0,T0,PI,G0,PSR,ADK,AMG,
UGC,FC0,RO0,DC0,SA0,SA,TSTAR,TKR,AKR,
PSTAR,PKR,ROSTAR,ROKR,W,P,T,RO,PA,WA,DW,
EPS,FC,DC : real;
INF,OUF : text;

```

B,C: VEC;
  label 110,120;
Procedure RKM(DX:real;N:integer;var A,E:real; var B,C:VEC;
              var IS:integer);
  var
  I : integer;
  F : array [1..10] of real;
  G : array [1..40] of real;
  label 10,30,50,60,80,100;
  begin
    IS:=IS+1;
    case IS of
    1: goto 10;
    2: goto 30;
    3: goto 60;
    4: goto 80;
    end;
10:  E:=A;
    for I:=1 to N do begin
      F[I]:=B[I]; G[4*I-3]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-3]/2.0 end;
      GOTO 50;
30:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I-2]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-2]/2.0 end;
50:  A:=E+DX/2.0;
      GOTO 100;
60:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I-1]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-1] end;
      A:=E+DX;
      GOTO 100;
80:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I]:=C[I]*DX;
      B[I]:=G[4*I-3]+2.0*(G[4*I-2]+G[4*I-1]);
      B[I]:=(B[I]+G[4*I])/6.0+F[I] end;
      IS:=0;
100: END; { of RKM }
      begin
        assign(INF,'LAV1A.DAT');
        assign(OUF,'REZPAS.DAT');
        reset(INF); rewrite(OUF);

```

```

    readln(INF, N,DX,Z,P0,W0,T0,PI);
    readln(INF, G0,PSR,ADK,AMG,UGC,KK);
    RO0:=P0*AMG/T0/UGC;
    SA0:=sqrt((ADK*UGC*T0/AMG));
    MAX0:=W0/SA0;
    TSTAR:=T0*(1.0+(ADK-1.0)*sqrt(MAX0)/2.0);
    PSTAR := P0*exp((ADK/(ADK-1.0))*ln(TSTAR/T0));
    N:=4; W:=W0; P:=P0; T:=T0; RO:=RO0;
    IS:=0;
    B[1]:=P0;
    B[2]:=W0;
    B[3]:=T0;
    B[4]:=RO0;
    K:=0; X:=0;
    writeln(OUF,' X   P   W   T   RO  DC   DW   EPS');
    writeln(OUF,' мм  Па   м/сек  К   кг/м3 мм  м/сек   %');
120:  X:=X+DX;
    K:=K+1;
    for LL:=1 TO 4 do begin
    C[1]:=-2.0*P0*(P0/PSR-1.0)*A/(sqrt(Z)*sqrt((P0/PSR-1.0)
    *sqrt(A/Z)+1.0));
    C[2]:=-C[1]/W/RO;
    C[3]:=-(ADK-1.0)*AMG*W*C[2]/ADK/UGC;
    C[4]:=RO*C[1]/P-RO*C[3]/T;
    RKM(DX,N,A,E,B,C,IS);
    P:=B[1];
    W:=B[2];
    T:=B[3];
    RO:=B[4];
    end;
    FC:=G0/W/RO;
    DC:=sqrt(4.0*FC/PI);
    PA:=P0/((P0/PSR-1.0)*sqrt(X/Z)+1.0);
    WA:=sqrt(2.0*ADK*UGC*TSTAR*(1.-exp(((ADK-1.0)/ADK)*
    ln(PA/PSTAR)))/((ADK-1.0)*AMG));
    DW:=WA-W;
    EPS:=DW*100.0/WA;
    IF(K=KK) then begin
    writeln(OUF,(X*1000):5:1,P:8:0,W:8:2,T:7:1,RO:8:3,
    (DC*1000):6:1,DW:9:5,EPS:9:5);
    K:=0    end;
    IF (X<Z) THEN GOTO 120

```

```

END.
БЕЙСИК:
' PROGRAM LAV1A
' Изэнтропийное расширение идеаль-
' ного газа в сопле Лавалья
' (тестовая задача-показывает погрешность
' численного метода).
  SHARED F(),GG(),X,A
  DIM B(10),C(10)
  OPEN "I",1,"LAV1A.DAT"
  OPEN "O",6,"REZBAS.DAT"
  INPUT#1, N,DX,Z,P0,W0,T0,PI
  INPUT#1,G0,PSR,ADK,AMG,UGC,KK
  RO0=P0*AMG/T0/UGC
  SA0=(ADK*UGC*T0/AMG)^0.5
  MAX0=W0/SA0
  TSTAR=T0*(1.+(ADK-1.)*MAX0^2/2.)
  PSTAR=P0*(TSTAR/T0)^(ADK/(ADK-1.))
  N=4
  W=W0
  P=P0
  T=T0
  RO=RO0
  IK=0
  B(1)=P0
  B(2)=W0
  B(3)=T0
  B(4)=RO0
  K=0
  X=0
  PRINT#6,_
" X    P    W    T    RO DC    DW    EPS"
  PRINT#6,_
" мм    Па    м/сек    К    кг/м3 мм    м/сек    %"
120 X=X+DX
  K=K+1
  FOR LL=1 TO 4
    C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*A/(Z^2*((P0/PSR-1.)_
*(A/Z)^2+1.)^2)
    C(2)=-C(1)/W/RO
    C(3)=- (ADK-1.)*AMG*W*C(2)/ADK/UGC
    C(4)=RO*C(1)/P-RO*C(3)/T

```

```

CALL RKM(A,DX,N,IK,B(),C())
P=B(1)
W=B(2)
T=B(3)
RO=B(4)
NEXT LL
FK=G0/W/RO
DD=(4.*FK/PI)^0.5
PA=P0/((P0/PSR-1.)*(X/Z)^2+1.)
WA=(2.*ADK*UGC*TSTAR*(1.-(PA/PSTAR)^((ADK-1.)/ADK))/_
((ADK-1.)*AMG))^0.5
DW=WA-W
EPS=DW/WA*100
IF K=KK THEN
PRINT#6, USING_
"#####.# #.####^^^###.# ###.# #.#### ##.# ##.##### ##.#####";_
X*1000,P,W,T,RO,DD*1000,DW,EPS
K=0
END IF
IF X<Z GOTO 120
STOP
END
SUB RKM(A,DX,N,Ik,B(),C())
DIM F(10),GG(40)
Ik=Ik+1
ON Ik GOTO 10,30,60,80
10  for I=1 to N
    F(I)=B(I)
    GG(4*I-3)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-3)/2.
next
A=A+DX/2.
GOTO 100
30  for I=1 to N
    GG(4*I-2)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-2)/2.
next
GOTO 100
60  for I=1 to N
    GG(4*I-1)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-1)
next

```

```

A=A+DX/2.
GOTO 100
80  for I=1 to N
    GG(4*I)=C(I)*DX
    B(I)=GG(4*I-3)+2.*(GG(4*I-2)+GG(4*I-1))
    B(I)=(B(I)+GG(4*I))/6.+F(I)
    next
    ik=0
100  abb=0
end sub 'RKM

```

Файл исходных данных LAV1A.DAT:

```

4 0.5E-3 0.15 6.E5 30. 426. 3.1416
0.3 1.E5 1.4 29. 8314. 10
N DX Z P0 W0 T0 PI
G0 PSR ADK AMG UGC KK

```

Файл результатов расчета REZL1A.DAT:

X	P	W	T	RO	DC	DW	EPS
0.005	596356.	48.856	425.26	4.891	0.040	-1.399	-2.947
0.010	586319.	80.718	423.20	4.833	0.031	-1.650	-2.087
0.015	570523.	114.528	419.91	4.739	0.027	-1.680	-1.489
0.020	549898.	148.106	415.52	4.616	0.024	-1.649	-1.126
0.025	525548.	180.712	410.18	4.469	0.022	-1.593	-0.889
0.030	498616.	211.982	404.06	4.304	0.020	-1.522	-0.723
0.035	470179.	241.718	397.33	4.128	0.020	-1.443	-0.600
0.040	441178.	269.817	390.17	3.944	0.019	-1.360	-0.507
0.045	412373.	296.246	382.72	3.758	0.019	-1.277	-0.433
0.050	384343.	321.020	375.10	3.574	0.018	-1.196	-0.374
0.055	357500.	344.189	367.42	3.394	0.018	-1.117	-0.326
0.060	332106.	365.822	359.76	3.220	0.018	-1.042	-0.286
0.065	308310.	386.006	352.20	3.053	0.018	-0.972	-0.252
0.070	286172.	404.832	344.78	2.895	0.018	-0.906	-0.224
0.075	265686.	422.396	337.54	2.746	0.018	-0.845	-0.200
0.080	246804.	438.790	330.51	2.605	0.018	-0.789	-0.180
0.085	229449.	454.105	323.69	2.473	0.018	-0.737	-0.163
0.090	213527.	468.426	317.11	2.349	0.019	-0.689	-0.147
0.095	198936.	481.834	310.76	2.233	0.019	-0.645	-0.134
0.100	185572.	494.401	304.65	2.125	0.019	-0.604	-0.122
0.105	173332.	506.198	298.77	2.024	0.019	-0.567	-0.112
0.110	162118.	517.286	293.11	1.929	0.020	-0.533	-0.103

0.115	151840.	527.722	287.68	1.841	0.020	-0.501	-0.095
0.120	142410.	537.559	282.46	1.759	0.020	-0.472	-0.088
0.125	133751.	546.844	277.44	1.682	0.020	-0.445	-0.082
0.130	125792.	555.620	272.62	1.609	0.021	-0.421	-0.076
0.135	118465.	563.927	267.98	1.542	0.021	-0.398	-0.071
0.140	111714.	571.799	263.53	1.479	0.021	-0.377	-0.066
0.145	105485.	579.270	259.24	1.419	0.022	-0.358	-0.062
0.150	99729.	586.369	255.12	1.364	0.022	-0.340	-0.058

LAV1T

Решение системы уравнений, описывающих движение идеального газа в сопле Лаваля при наличии трения. Исходными данными являются значения параметров газа и диаметр канала в начальном сечении сопла, длина и геометрия сопла, шаг по координате, вязкость газа из файла LAV1T.DAT. Результаты расчета выводятся в файл REZL1T.DAT.

Идентификаторы программы

VIS-коэффициент динамической вязкости газа, $\tilde{\mu}$, Па·с
 IMP-полный импульс газа, $pf+Gw$, Н
 DCM, DCSR-диаметры минимального и выходного сечений канала
 ZCC,ZCM,ZCD-длины соответственно сужающейся,цилиндрической и расширяющейся частей канала
 FCM-площадь поперечного сечения с минимальным диаметром
 G00T-отношение $\dot{G}_T / \dot{G}_{кр}$
 REN-число Рейнольдса, $\rho wD/\tilde{\mu}$
 DZ-коэффициент сопротивления трения
 CF-коэффициент трения, c_f
 TW-касательное напряжение трения на стенке, τ_w
 PIM-давление, определенное из уравнения сохранения импульса
 POT-отношение $p/p_{кр}$
 WI-скорость, определенная по уравнению сохранения потока массы
 DWI-разница $W-WI$
 WS-скорость при изоэнтропийном расширении, w_S
 FIN- коэффициент скорости сопла, φ_c .

PROGRAM LAV1T

C Расчет сопла Лаваля, работающего на

C идеальном газе, с учетом сил трения.

C Геометрия сопла задана-прямая задача

```

REAL MAX,MAX0,IMP0,IMP
DIMENSION B(10),C(10)
OPEN (2,FILE='LAV1T.DAT')
OPEN (6,FILE='REZL1T.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,P0,T0,W0,PI,VIS0
READ(2,*) ADK,AMG,UGC,KK
READ(2,*) DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD
Z=ZCC+ZCM+ZCD
RO0=P0*AMG/T0/UGC
FC0=PI*DC0**2/4.
FCM=PI*DCM**2/4.
G0=W0*RO0*FC0
SA0=(ADK*UGC*T0/AMG)**0.5
MAX0=W0/SA0
TSTAR=T0*(1.+(ADK-1.)*MAX0**2/2.)
TKR=2.*TSTAR/(ADK+1.)
AKR=(ADK*UGC*TKR/AMG)**0.5
PSTAR=P0*(TSTAR/T0)**(ADK/(ADK-1.))
ROSTAR=RO0*(TSTAR/T0)**(1./(ADK-1.))
PKR=PSTAR*(TKR/TSTAR)**(ADK/(ADK-1.))
ROKR=ROSTAR*(TKR/TSTAR)**(1./(ADK-1.))
GKR=AKR*FCM*ROKR
GOOT=G0/GKR
IMP0=P0*FC0+G0*W0
N=5
W=W0
P=P0
T=T0
RO=RO0
IMP=IMP0
IS=0
B(1)=P0
B(2)=W0
B(3)=T0
B(4)=RO0
B(5)=IMP0
J=0
K=0
X=0
WRITE(6,*)' X    P    W    T    CF    RO    DC

```

```

&FIN IMP PIM DWI MAX POT WS'
120 X=X+DX
    K=K+1
    A=X
    DO 110 LL=1,4
    IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
    IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
    IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
    FC=PI*DC**2/4.
    IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
    IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) PRFC=0.0
    IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)*
& (DCSR-DCM)/(2.*ZCD)
    W=G0/RO/FC
    REN=W*DC*RO/VIS0
    DZ=1./((1.82*ALOG10(REN)-1.64)**2)
    CF=DZ/4.
    TW=CF*RO*W**2/2.
    SA=(ADK*UGC*T/AMG)**0.5
    MAX=W/SA
    OPR=MAX**2-1.
    POT=P/PKR
    C(1)=MAX**2*ADK*P*(2.*CF*(1.+(ADK-1.)*MAX**2)/DC
& -PRFC/FC)/(MAX**2-1.)
    C(2)=-C(1)/W/RO-2.*CF*W/DC
    C(3)=-((ADK-1.)*AMG*W*C(2))/ADK/UGC
    C(4)=RO*C(1)/P-RO*C(3)/T
    C(5)=-TW*PI*DC
110 CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
    P=B(1)
    W=B(2)
    T=B(3)
    RO=B(4)
    IMP=B(5)
    PIM=(IMP-G0**2/FC/RO)/FC
    WI=G0/FC/RO
    DWI=W-WI
    WS=(2.*ADK*UGC*TSTAR*(1.-(P/PSTAR)**((ADK-1.)/ADK))/
& ((ADK-1.)*AMG))**0.5

```

```

FIN=W/WS
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(6,200)X,P,W,T,CF,RO,DC,FIN,IMP,PIM,DWI,MAX,POT,
& WS
K=0
J=J+1
      END IF
IF (J.EQ.10) THEN
WRITE(6,*)' X   P   W   T   CF   RO   DC
&FIN  IMP   PIM   DWI   MAX   POT   WS'
J=0
      END IF
IF(X.LT.Z)GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F9.0,F8.2,F6.0,3F6.3,2F10.3,F10.0,4F8.3)
STOP
END

```

ПАСКАЛЬ:

PROGRAM LAV1T;

{ Расчет сопла Лавалия, работающего на
идеальном газе, с учетом сил трения.
Геометрия сопла задана-прямая задача }

type VEC=array [1..10] of real;

var

LL,IS,N,I,KK,K : integer;

MAX0,MAX,E,A,X,DX,Z,P0,W0,T0,PI,G0,PSR,ADK,AMG,
UGC,FC0,RO0,DC0,SA0,SA,TSTAR,TKR,AKR,
PSTAR,PKR,ROSTAR,ROKR,W,P,T,RO,PA,WA,DW,
EPS,FC,DC,IMP0,IMP,VIS0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,
FCM,GKR,G0OT,PRFC,REN,DZ,TW,CF,OPR,POT,PIM,
WI,DWI,WS,FIN : real;

INF,OUF : text;

B,C: VEC;

label 110,120;

Procedure RKM(DX:real;N:integer;var A,E:real; var B,C:VEC;
var IS:integer);

var

I : integer;

F : array [1..10] of real;

G : array [1..40] of real;

label 10,30,50,60,80,100;

```

begin
  IS:=IS+1;
  case IS of
  1: goto 10;
  2: goto 30;
  3: goto 60;
  4: goto 80;
  end;
10:  E:=A;
    for I:=1 to N do begin
      F[I]:=B[I]; G[4*I-3]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-3]/2.0 end;
      GOTO 50;
30:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I-2]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-2]/2.0 end;
50:  A:=E+DX/2.0;
      GOTO 100;
60:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I-1]:=C[I]*DX;
      B[I]:=F[I]+G[4*I-1] end;
      A:=E+DX;
      GOTO 100;
80:  for I:=1 to N do begin
      G[4*I]:=C[I]*DX;
      B[I]:=G[4*I-3]+2.0*(G[4*I-2]+G[4*I-1]);
      B[I]:=(B[I]+G[4*I])/6.0+F[I] end;
      IS:=0;
100: END; { of RKM }
begin
  assign(INF,'LAV1T.DAT');
  assign(OUF,'REZ1TP.DAT');
  reset(INF); rewrite(OUF);
  readln(INF,N,DX,Z,P0,T0,W0,PI,VIS0);
  readln(INF, ADK,AMG,UGC,KK);
  readln(INF, DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD);
  Z:=ZCC+ZCM+ZCD;
  RO0:=P0*AMG/T0/UGC;
  FC0:=PI*sqr(DC0)/4.0;
  FCM:=PI*sqr(DCM)/4.0;
  G0:=W0*RO0*FC0;
  SA0:=sqrt(ADK*UGC*T0/AMG);

```

```

MAX0:=W0/SA0;
TSTAR:=T0*(1.0+(ADK-1.0)*sqr(MAX0)/2.0);
TKR:=2.0*TSTAR/(ADK+1.0);
AKR:=sqrt(ADK*UGC*TKR/AMG);
PSTAR:=exp(ADK/(ADK-1.0)*ln(P0*(TSTAR/T0)));
ROSTAR:=RO0*exp(1.0/(ADK-1.0)*ln(TSTAR/T0));
PKR:=PSTAR*exp(ADK/(ADK-1.0)*ln(TKR/TSTAR));
ROKR:=ROSTAR*exp(1.0/(ADK-1.0)*ln(TKR/TSTAR));
GKR:=AKR*FCM*ROKR;
G0OT:=G0/GKR;
IMP0:=P0*FC0+G0*W0;
N:=5;
W:=W0;
P:=P0;
T:=T0;
RO:=RO0;
IMP:=IMP0;
IS:=0;
B[1]:=P0;
B[2]:=W0;
B[3]:=T0;
B[4]:=RO0;
B[5]:=IMP0;
K:=0;
X:=0;
writeln(OUF,' X ' P ' W ' T ' CF ' RO ' ,
' DC ' FIN ' ,
' IMP ' PIM ' DWI ' MACH ' P/PKR ' WS');
writeln(OUF,' мм ' Па ' м/с ' К ' кг/м3 ' мм ' ,
' Па ' м/с ' м/с');
120: X:=X+DX;
K:=K+1;
for LL:=1 to 4 do begin
IF(X<ZCC) then DC:=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC;
IF(X>ZCC) AND (X<=(ZCC+ZCM)) then DC:=DCM;
IF(X>(ZCC+ZCM)) then DC:=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD;
FC:=PI*sqr(DC)/4.0;
IF(X<ZCC) then PRFC:=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2.0/ZCC;
IF(X>=ZCC) AND (X<=(ZCC+ZCM)) then PRFC:=0.0;

```

```

IF(X>(ZCC+ZCM)) then PRFC:=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)*
(DCSR-DCM)/(2.0*ZCD);
W:=G0/RO/FC;
REN:=W*DC*RO/VIS0;
DZ:=1.0/sqr(1.82*ln(REN)/2.3025-1.64);
CF:=DZ/4.0;
TW:=CF*RO*sqr(W)/2.0;
SA:=sqrt(ADK*UGC*T/AMG);
MAX:=W/SA;
OPR:=sqr(MAX)-1.0;
POT:=P/PKR;
C[1]:=sqr(MAX)*ADK*P*(2.0*CF*(1.0+(ADK-1.0)*sqr(MAX))/DC
-PRFC/FC)/(sqr(MAX)-1.0);
C[2]:=-C[1]/W/RO-2.0*CF*W/DC;
C[3]:=-(ADK-1.0)*AMG*W*C[2]/ADK/UGC;
C[4]:=RO*C[1]/P-RO*C[3]/T;
C[5]:=-TW*PI*DC;
RKM(DX,N,A,E,B,C,IS);
end;
P:=B[1];
W:=B[2];
T:=B[3];
RO:=B[4];
IMP:=B[5];
PIM:=(IMP-sqr(G0)/FC/RO)/FC;
WI:=G0/FC/RO;
DWI:=W-WI;
WS:=sqrt(2.0*ADK*UGC*TSTAR*(1.0-exp((ADK-
1.0)/ADK*ln(P/PSTAR)))/
((ADK-1.0)*AMG));
FIN:=W/WS;
IF(K=KK) THEN
BEGIN
writeln(OUF,X*1000:5:1,P:8:0,W:8:3,T:7:3,CF,RO:7:3,DC*1000:5:1,
FIN:7:3,IMP,PIM:8:0,DWI:7:3,MAX:7:3,POT:7:3,WS:7:3);
K:=0;
END ;
IF (X<Z) then GOTO 120;
END.

```

БЕЙСИК:

```

'   PROGRAM LAV1T
'   Расчет сопла Лавалья, работающего на
'   идеальном газе, с учетом сил трения.
'   Геометрия сопла задана-прямая задача
  SHARED F(),GG(),X,A
  DIM B(10),C(10)
  OPEN "I",1,"LAV1T.DAT"
  OPEN "O",6,"REZ1TB.DAT"
  INPUT#1,N,DX,Z,P0,T0,W0,PI,VIS0
  INPUT#1,ADK,AMG,UGC,KK
  INPUT#1,DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD
  Z=ZCC+ZCM+ZCD
  RO0=P0*AMG/T0/UGC
  FF0=PI*DC0^2/4.
  FFM=PI*DCM^2/4.
  G0=W0*RO0*FF0
  SA0=(ADK*UGC*T0/AMG)^0.5
  MACH0=W0/SA0
  TSTAR=T0*(1.+(ADK-1.)*MACH0^2/2.)
  TKR=2.*TSTAR/(ADK+1.)
  AKR=(ADK*UGC*TKR/AMG)^0.5
  PSTAR=P0*(TSTAR/T0)^(ADK/(ADK-1.))
  ROSTAR=RO0*(TSTAR/T0)^(1./(ADK-1.))
  PKR=PSTAR*(TKR/TSTAR)^(ADK/(ADK-1.))
  ROKR=ROSTAR*(TKR/TSTAR)^(1./(ADK-1.))
  GKR=AKR*FFM*ROKR
  GOOT=G0/GKR
  AIMP0=P0*FF0+G0*W0
  N=5
  W=W0
  P=P0
  T=T0
  RO=RO0
  AIMP=AIMP0
  Ik=0
  B(1)=P0
  B(2)=W0
  B(3)=T0
  B(4)=RO0
  B(5)=AIMP0
  K=0
  X=0

```

```

PRINT#6," X P W T CF RO DC FIN ";
PRINT#6,"IMP PIM DWI MACH P/PKR WS"
120 X=X+DX
    K=K+1
    FOR LL=1 TO 4
        SELECT CASE X
        CASE <ZCC
            DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
            PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-DCM)/2./ZCC
            CASE ZCC TO (ZCC+ZCM)
                DC=DCM
                PRFC=0.0
            CASE >(ZCC+ZCM)
                DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-(ZCC+ZCM))/ZCD
                PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-(ZCC+ZCM))/ZCD)*(DCSR-
                DCM)/(2.*ZCD)
            END SELECT
            FF=PI*DC^2/4.
            W=G0/RO/FF
            REN=W*DC*RO/VIS0
            DZ=1./((1.82*LOG10(REN)-1.64)^2)
            CF=DZ/4.
            TW=CF*RO*W^2/2.
            SA=(ADK*UGC*T/AMG)^0.5
            MACH=W/SA
            OPR=MACH^2-1.
            POT=P/PKR
            C(1)=MACH^2*ADK*P*(2.*CF*(1.+(ADK-1.)*MACH^2)/DC_
            -PRFC/FF)/(MACH^2-1.)
            C(2)=-C(1)/W/RO-2.*CF*W/DC
            C(3)=- (ADK-1.)*AMG*W*C(2)/ADK/UGC
            C(4)=RO*C(1)/P-RO*C(3)/T
            C(5)=-TW*PI*DC
            CALL RKM(A,DX,N,Ik,B(),C())
        NEXT LL
        P=B(1)
        W=B(2)
        T=B(3)
        RO=B(4)
        AIMP=B(5)
        PIM=(AIMP-G0^2/FF/RO)/FF
        WI=G0/FF/RO

```



```

DWI=W-WI
WS=(2.*ADK*UGC*TSTAR*(1.-(P/PSTAR)^((ADK-1.)/ADK))/_
((ADK-1.)*AMG))^0.5
FIN=W/WS
IF K=KK THEN
  PRINT#6,USING "#####.# #####.###.# ###.# #.###^^^
###.###.###.# #.###.###.# #####.###.###.#.###.#.###.###.###";_
  X*1000,P,W,T,CF,RO,DC*1000,FIN,AIMP,PIM,DWI,_
  MACH,POT,WS
  K=0
  END IF
IF X<Z THEN GOTO 120
STOP
END
SUB RKM(A,DX,N,Ik,B(),C())
  DIM F(10),GG(40)
  Ik=Ik+1
  ON Ik GOTO 10,30,60,80
10  for I=1 to N
    F(I)=B(I)
    GG(4*I-3)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-3)/2.
  next
  A=A+DX/2.
  GOTO 100
30  for I=1 to N
    GG(4*I-2)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-2)/2.
  next
  GOTO 100
60  for I=1 to N
    GG(4*I-1)=C(I)*DX
    B(I)=F(I)+GG(4*I-1)
  next
  A=A+DX/2.
  GOTO 100
80  for I=1 to N
    GG(4*I)=C(I)*DX
    B(I)=GG(4*I-3)+2.*(GG(4*I-2)+GG(4*I-1))
    B(I)=(B(I)+GG(4*I))/6.+F(I)
  next
  ik=0

```

100 abb=0
end sub 'RKM

Файл исходных данных LAVIT.DAT

5 0.5E-3 0.15 6.E5 426. 17.3 3.1416 21.7E-6
1.4 29. 8314. 10
3.E-2 8.E-3 1.2E-2 4.E-2 1.E-3 0.105

N DX Z P0 T0 W0 PI VIS0
ADK AMG UGC KK
DC0 DCM DCSR ZCC ZCM ZCD

Файл результатов расчета REZL1A.DAT:

X	P	W	T	CF	RO	DN	FIN	IMP	DWI	M	POT	WS
0.005	599643	21.0	426	0.004	4.91	0.027	0.99	425.	0.0	0.05	1.89	21.0
0.010	599048	26.1	426	0.004	4.90	0.024	0.99	425.	0.1	0.06	1.88	26.2
0.015	597994	33.2	426	0.004	4.90	0.022	0.99	425.	0.2	0.08	1.88	33.4
0.020	595981	43.8	425	0.004	4.88	0.019	0.99	425.	0.4	0.10	1.87	44.0
0.025	591722	60.4	424	0.004	4.86	0.016	0.99	425.	0.8	0.14	1.86	60.7
0.030	581305	89.0	422	0.004	4.80	0.014	0.99	425.	1.6	0.21	1.83	89.4
0.035	548861	146.	415	0.004	4.60	0.011	0.99	425.	3.3	0.34	1.74	147.
0.040	289196	397.	350	0.003	2.94	0.008	0.99	425.	-7.7	0.85	1.22	401.
0.045	237682	439.	332	0.003	2.55	0.008	0.98	424.	-10.5	1.21	0.76	446.
0.050	205620	466.	320	0.003	2.29	0.008	0.98	424.	-12.1	1.32	0.65	475.
0.055	183109	485.	311	0.003	2.10	0.009	0.97	424.	-13.3	1.40	0.58	496.
0.060	165523	500.	303	0.003	1.95	0.009	0.97	424.	-14.2	1.46	0.52	513.
0.065	151102	513.	297	0.003	1.82	0.009	0.97	424.	-15.1	1.52	0.48	527.
0.070	138934	524.	291	0.003	1.70	0.009	0.97	424.	-15.9	1.57	0.44	540.
0.075	128467	533.	286	0.003	1.60	0.009	0.96	424.	-16.6	1.61	0.40	552.
0.080	119337	542.	281	0.003	1.51	0.009	0.96	424.	-17.2	1.65	0.37	562.
0.085	111288	550.	277	0.003	1.43	0.010	0.96	423.	-17.9	1.69	0.35	571.
0.090	104131	557.	273	0.003	1.36	0.010	0.96	423.	-18.4	1.72	0.33	580.
0.095	97722	563.	269	0.004	1.29	0.010	0.95	423.	-19.0	1.76	0.31	588.
0.100	91947	569.	266	0.004	1.23	0.010	0.95	423.	-19.5	1.79	0.29	595.
0.105	86718	574.	263	0.004	1.18	0.010	0.95	423.	-20.0	1.82	0.27	602.
0.110	81962	579.	260	0.004	1.12	0.011	0.95	423.	-20.5	1.84	0.26	609.
0.115	77619	583.	257	0.004	1.08	0.011	0.94	423.	-20.9	1.87	0.24	615.
0.120	73638	588.	254	0.004	1.03	0.011	0.94	423.	-21.4	1.89	0.23	621.
0.125	69978	592.	252	0.004	0.99	0.011	0.94	423.	-21.8	1.92	0.22	626.
X	P	W	T	CF	RO	DN	FIN	IMP	DWI	M	POT	WS
0.130	66603	595.	250	0.004	0.95	0.011	0.94	422.	-22.2	1.94	0.21	631.
0.135	63483	599.	248	0.004	0.91	0.012	0.94	422.	-22.6	1.96	0.20	636.
0.140	60590	602.	246	0.004	0.88	0.012	0.94	422.	-23.0	1.98	0.19	641.
0.145	57903	605.	244	0.004	0.85	0.012	0.93	422.	-23.3	2.00	0.18	645.

Приложение №2

Идентификаторы программ GM1A , GM1-GM4, GM1QT

VV,VL- удельный объем пара и воды на линии насыщения

WV,WL- скорость пара и воды

WLV- скорость парожидкостной смеси

SV,SW- энтропия пара и воды на линии насыщения

S- энтропия парожидкостной смеси

PROGRAM GM1A

C Изоэнтальпийное расширение гомогенного

C потока в сопле Лавала - прямая задача

C (задана геометрия сопла и начальная

C степень сухости -XV0).

DIMENSION B(10),C(10)

REAL MAX

VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6

RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2

YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3

SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3

SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3

CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2

IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3

CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2

CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2

SL(A)=0.087725+0.0131875*(A-273.)-9.9375E-6*(A-273.)**2

SP(A)=8.764128-0.0165849*(A-273.)+2.49062E-5*(A-273.)**2

OPEN (2,FILE='GM1A.DAT')

OPEN (8,FILE='REZGM1A.DAT')

READ(2,*) N,DX,Z,WLV0,P0,XV0,PSR,PI,KK,

& DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD

Z=ZCC+ZCM+ZCD

N=4

FC0=PI*DC0**2/4.

T0=5.677*P0**0.25+273.

ROV0=1.213E-5*P0**0.9375

```

ROL0=RO(T0)
VL0=1./ROL0
VV0=1./ROV0
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
S0=(1.-XV0)*SL(T0)+XV0*SP(T0)
FC=FC0
T=T0
ROL=ROL0
ROV=ROV0
WL0=WL0
V=V0
P=P0
DC=DC0
IS=0
B(1)=P
B(2)=WL0
B(3)=V
B(4)=T
K=0
J=0
X=0
WRITE(8,*)' X P WL0 SA V MAX T
& DC XV PV'
120 X=X+DX
A=X
K=K+1
DO 110 LL=1,4
ROV=1.213E-5*P**0.9375
IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
FC=PI*DC**2/4.
IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) PRFC=0.0
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)*
& (DCSR-DCM)/(2.*ZCD)
ROL=RO(T)
VV=1./ROV
VL=1./ROL

```

```

SW=SL(T)
SV=SP(T)
XV=(S0-SW)/(SV-SW)
CV=(1.-XV)*CVL(T)+XV*CVV(T)
R=SQV(T)
SA=((V*R/(VV-VL))**2/CV/T)**0.5
MAX=WLV/SA
PV=P0/((P0/PSR-1.)*(A/Z)**2+1.)
C(1)=-WLV**2*PRFC/(MAX**2-1.)/V/FC
C(2)=WLV*PRFC/FC/(MAX**2-1.)
C(3)=MAX**2*V*PRFC/FC/(MAX**2-1.)
C(4)=-T*(VV-VL)*WLV**2*PRFC/(MAX**2-1.)/R/V/FC
110 CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
P=B(1)
WLV=B(2)
V=B(3)
T=B(4)
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(8,200) X,P,WLV,SA,V,MAX,T,DC,XV,PV
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X P WL V SA V MAX T
& DC XV PV'
J=0
END IF
K=0
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
200 FORMAT(F6.3,F10.0,4F8.3,F8.2,2F6.3,F10.0)
STOP
END

```

Файл исходных данных GM1A.DAT

```

4 0.3E-3 0.15 30. 6.E5 0.1 1.E5 3.1416 10
3.E-2 18.72E-3 2.8685E-2 4.E-2 1.E-3 0.105

```

```

N, DX, Z, CWV0 ,P0, XV0, PSR, PI, KK
DC0, DCM, DCSR ZCC ZCM ZCD

```

PROGRAM GM2

```

C Изоэнтروпийное расширение гомогенного
C потока в сопле Лавалия - обратная задача

```

```

C   ( задано распределение давления вдоль сопла и
C   начальная степень сухости-XV0 ).
DIMENSION B(10),C(10)
REAL MAX
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
SL(A)=(0.087725+0.0131875*(A-273.)-9.9375E-6*(A-
273.)**2)*1.E3
SP(A)=(8.764128-0.0165849*(A-273.)+2.49062E-5*(A-
273.)**2)*1.E3
PVL(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A-
& 11.48776*ALOG(A))
OPEN (2,FILE='GM2.DAT')
OPEN (8,FILE='REZGM2.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,WLV0,P0,
& XV0,D0,PSR,PI,KK
N=5
F0=PI*D0**2/4.
T0=5.677*P0**0.25+273.
ROV0=1.213E-5*P0**0.9375
ROL0=RO(T0)
VL0=1./ROL0
VV0=1./ROV0
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
SW0=SL(T0)
SV0=SP(T0)
S0=(1.-XV0)*SW0+XV0*SV0
T=T0
WLV=WLV0
V=V0
P=P0
F=F0
D=D0
IS=0
B(1)=P

```

```

B(2)=F
B(3)=WLV
B(4)=V
B(5)=T
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X P WL V SA V MAX T
& DC XV PV'

```

```

120 X=X+DX
A=X
K=K+1
DO 110 LL=1,4
ROV=1.213E-5*P**0.9375
ROL=RO(T)
VV=1./ROV
VL=1./ROL
SW=SL(T)
SV=SP(T)
SW0=SL(T0)
SV0=SP(T0)
S0=(1.-XV0)*SW0+XV0*SV0
XV=(S0-SW)/(SV-SW)
V=(1.-XV)*VL+XV*VV
CV=(1.-XV)*CVL(T)+XV*CVV(T)
R=SQV(T)
SA=((V*R/(VV-VL))**2/CV/T)**0.5
MAX=WLV/SA
PV=P0/((P0/PSR-1.)*(A/Z)**2+1.)
C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*A/(Z**2*((P0/PSR-
1.)*(A/Z)**2+1.))**2)
C(2)=-((MAX**2-1.)*V*F*C(1)/WLV/WLV
C(3)=WLV*C(2)/F/(MAX**2-1.)
C(4)=MAX**2*V*C(2)/F/(MAX**2-1.)
C(5)=-T*(VV-VL)*WLV**2*C(2)/(MAX**2-1.)/R/V/F
110 CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
P=B(1)
F=B(2)
WLV=B(3)
V=B(4)
T=B(5)

```

```

D=(4.*F/PI)**0.5
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(8,200) X,P,WLV,SA,V,MAX,T,D,XV,PV
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X P WLW SA V MAX T
& DC XV PV'
J=0
END IF
K=0
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
200 FORMAT(F6.3,F10.0,4F8.3,F8.2,2F6.3,F10.0)
STOP
END

```

Файл исходных данных GM2.DAT

```
5 0.3E-3 0.15 30. 6.E5 0.1 3.E-2 1.E5 3.1416 10
```

```
N, DX, Z, WLW0 ,P0, XV0 D0, PSR, PI, KK
```

В программах GM3 и GM4 для определения физических свойств и термодинамических параметров компонентов используются не эмпирические формулы, а аппроксимация функций по табличным значениям. Подпрограммы SPLINE и SEVAL служат для

- 1) аппроксимации таблично заданной функции (N точек, x_i , y_i , $i=1,N$) полиномом третьей степени; подпрограмма SPLINE вычисляет коэффициенты этого полинома
- 2) интерполяции значений функции $y(x)$ в интервале от x_{\min} до x_{\max} . Результатом работы подпрограммы SEVAL является значение функции y , производные y' и y'' при заданном значении аргумента.

SPLINE:

Входные параметры: N- число точек, X(I)- значения аргумента, Y(I)- значения функции

Выходные параметры: B,C,D- коэффициенты полинома

SEVAL:

Входные параметры: N- число точек, X(I)- значения аргумента, Y(I)- значения функции, B,C,D- коэффициенты полинома, полученные от SPLINE, U- аргумент для вычисления интерполированного значения

Выходные параметры: S- значение функции в точке U; SP,SPP- первая и вторая производные в точке U.

PROGRAM GM3

```

C   Используются подпрограммы: spline,
C   seval,rkm.
C   Изоэнтروпийное расширение гомогенного
C   потока в сопле Лавала - обратная задача
C   ( задано распределение давления вдоль сопла и
C   начальная степень сухости-XV0 ).
DIMENSION B1(10),C1(10)
DIMENSION P(9),T(9),VL(9),VV(9),R(9),ENL(9),ENV(9),
& SL(9),SV(9),BSL(9),CSL(9),DSL(9),BSV(9),CSV(9),DSV(9),
& CPW(9),CVL(9),CVP(9),BT(9),CT(9),DT(9),BVL(9),
& DVL(9),BVV(9),CVV(9),DVV(9),BR(9),CR(9),
& DR(9),BENL(9),CENL(9),DENL(9),BENV(9),CENV(9),
& DENV(9),BCPW(9),CCPW(9),DCPW(9),BCVL(9),CCVL(9),
& DCVL(9),BCVP(9),CCVP(9),DCVP(9),BP(9),CP(9),DP(9)
REAL MAX
OPEN(2,FILE='GM3.DAT')
OPEN(8,FILE='REZGM3.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,WLV0,P0,
& XV0,D0,PSR,PI,KK
READ(2,*) (T(I),I=1,9)
READ(2,*) (P(I),I=1,9)
READ(2,*) (VL(I),I=1,9)
READ(2,*) (VV(I),I=1,9)
READ(2,*) (ENL(I),I=1,9)
READ(2,*) (ENV(I),I=1,9)
READ(2,*) (SL(I),I=1,9)
READ(2,*) (SV(I),I=1,9)
READ(2,*) (R(I),I=1,9)
READ(2,*) (CVL(I),I=1,9)
READ(2,*) (CVP(I),I=1,9)
READ(2,*) (CPW(I),I=1,9)
CALL SPLINE(9,P,T,BT,CT,DT)
CALL SPLINE(9,T,P,BP,CP,DP)
CALL SPLINE(9,T,VL,BVL,CVL,DVL)
CALL SPLINE(9,T,VV,BVV,CVV,DVV)
CALL SPLINE(9,T,ENL,BENL,CENL,DENL)
CALL SPLINE(9,T,ENV,BENV,CENV,DENV)
CALL SPLINE(9,T,SL,BSL,CSL,DSL)
CALL SPLINE(9,T,SV,BSV,CSV,DSV)
CALL SPLINE(9,T,R,BR,CR,DR)

```

```

CALL SPLINE(9,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL)
CALL SPLINE(9,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP)
CALL SPLINE(9,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW)
N=5
CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,P1ENLS,P2ENLS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,P1ENVS,P2ENVS)
CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL,CVLS,P1CVLS,P2CVLS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
CALL
SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
F0=PI*D0**2/4.
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
S0=(1.-XV0)*SL0+XV0*SV0
D=D0
F=F0
PS=P0
WLV=WLV0
IS=0
B1(1)=P0
B1(2)=F0
B1(3)=WLV0
B1(4)=V0
B1(5)=T0
J=0
K=0

```

```

X=0
WRITE(8,*)' X   PS   WLW   SA   V   MAX
&TS  DC  XV   PV'
120  X=X+DX
     A=X
     K=K+1
     CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
     CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
     CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
     CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
     CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
     CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
     CALL
SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,P1ENLS,P2ENLS)
     CALL
SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,P1ENVS,P2ENVS)
     CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
     CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
     CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
     CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
     CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
     CALL
SEVAL(9,TS,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL,CVLS,P1CVLS,P2CVLS)
     CALL
SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
     CALL
SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
     CALL
SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
     DO 110 LL=1,4
     TSK=TS+273.
     XV=(S0-SLS)/(SVS-SLS)
     V=(1.-XV)*VLS+XV*VVS
     CV=(1.-XV)*CVLS+XV*CVPS
     SA=((V*RS)/(VVS-VLS))**2/CV/TSK)**0.5
     MAX=WLV/SA
     PV=P0/((P0/PSR-1.)*(A/Z)**2+1.)
     C1(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*A/(Z**2*((P0/PSR-
1.)*(A/Z)**2+1.))**2)
     C1(2)=-((MAX**2-1.)*V*F*C1(1)/WLV/WLV
     C1(3)=WLV*C1(2)/F/(MAX**2-1.)
     C1(4)=MAX**2*V*C1(2)/F/(MAX**2-1.)

```

```

C1(5)=-TSK*(VVS-VLS)*WLV**2*C1(2)/(MAX**2-1.)/RS/V/F
110  CALL RKM(A,DX,N,IS,B1,C1)
      PS=B1(1)
      F=B1(2)
      WLW=B1(3)
      V=B1(4)
      TS=B1(5)
      D=(4.*F/PI)**0.5
      IF(K.EQ.KK) THEN
        WRITE(8,200) X,PS,WLV,SA,V,MAX,TS,D,XV,PV
        J=J+1
        IF(J.EQ.10) THEN
          WRITE(8,*)' X   PS   WLW   SA   V   MAX
&TS   DC   XV   PV'
          J=0
        END IF
        K=0
      END IF
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F10.0,4F8.3,F8.2,2F6.3,F10.0)
      STOP
      END
      SUBROUTINE SPLINE(N,X,Y,B,C,D)
      DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
      NM1=N-1
      IF(N.LT.2) RETURN
      IF(N.LT.3) GO TO 50
      D(1)=X(2)-X(1)
      C(2)=(Y(2)-Y(1))/D(1)
      DO 10 I=2,NM1
        D(I)=X(I+1)-X(I)
        B(I)=2.0*(D(I-1)+D(I))
        C(I+1)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)
        C(I)=C(I+1)-C(I)
10  CONTINUE
      B(1)=-D(1)
      B(N)=-D(N-1)
      C(1)=0.0
      C(N)=0.0
      IF(N.EQ.3) GO TO 15
      C(1)=C(3)/(X(4)-X(2))-C(2)/(X(3)-X(1))
      C(N)=C(N-1)/(X(N)-X(N-2))-C(N-2)/(X(N-1)-X(N-3))

```

```

C(1)=C(1)*D(1)**2/(X(4)-X(1))
C(N)=-C(N)*D(N-1)**2/(X(N)-X(N-3))
15  DO 20 I=2,N
    T=D(I-1)/B(I-1)
    B(I)=B(I)-T*D(I-1)
    C(I)=C(I)-T*C(I-1)
20  CONTINUE
    C(N)=C(N)/B(N)
    DO 30 IB=1,NM1
      I=N-IB
      C(I)=(C(I)-D(I)*C(I+1))/B(I)
30  CONTINUE
    B(N)=(Y(N)-Y(NM1))/D(NM1)+D(NM1)*(C(NM1)+2.0*C(N))
    DO 40 I=1,NM1
      B(I)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)-D(I)*(C(I+1)+2.0*C(I))
      D(I)=(C(I+1)-C(I))/D(I)
      C(I)=3.0*C(I)
40  CONTINUE
    C(N)=3.0*C(N)
    D(N)=D(N-1)
    RETURN
50  B(1)=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))
    C(1)=0.0
    D(1)=0.0
    B(2)=B(1)
    C(2)=0.0
    D(2)=0.0
    RETURN
    END
SUBROUTINE SEVAL(N,U,X,Y,B,C,D,S,SP,SPP)
DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
DATA I/1/
IF(I.GE.N) I=1
IF(U.LT.X(I)) GO TO 10
IF(U.LE.X(I+1)) GO TO 30
10  I=1
    J=N+1
20  K=(I+J)/2
    IF(U.LT.X(K)) J=K
    IF(U.GE.X(K)) I=K
    IF(J.GT.I+1) GO TO 20
30  DX=U-X(I)

```

$$S=Y(I)+DX*(B(I)+DX*(C(I)+DX*D(I)))$$

$$SP=B(I)+DX*(2.*C(I)+3.*DX*D(I))$$

$$SPP=2.*C(I)+6.*DX*D(I)$$

RETURN

END

Файл исходных данных GM3.DAT

5 0.3E-3 0.15 30. 6.E5 0.1 3.E-2 1.E5 3.1416 10

100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180.

1.01E5 1.43E5 1.98E5 2.70E5 3.61E5 4.76E5 6.18E5 7.92E5 10.03E5

1.04E-3 1.05E-3 1.06E-3 1.07E-3 1.08E-3 1.09E-3 1.1E-3 1.11E-3

1.13E-3

1.673 1.21 0.8917 0.6683 0.5087 0.3926 0.3068 0.2426 0.1939

419.E3 461.E3 503.E3 546.E3 589.E3 632.E3 675.E3 719.E3 763.E3

2676.E3 2691.E3 2706.E3 2721.E3 2734.E3 2746.E3 2758.E3 2769.E3

2778.E3

1.307E3 1.418E3 1.528E3 1.635E3 1.739E3 1.842E3 1.943E3 2.042E3

2.1395E3

7.355E3 7.239E3 7.13E3 7.027E3 6.93E3 6.838E3 6.751E3 6.667E3

6.5858E3

2257.E3 2230.E3 2202.E3 2175.E3 2145.E3 2114.E3 2082.E3 2050.E3

2015.E3

4.22E3 4.23E3 4.24E3 4.26E3 4.28E3 4.3E3 4.33E3 4.35E3 4.38E3

71.02E3 65.91E3 61.3E3 57.11E3 53.3E3 49.82E3 46.63E3 43.66E3

40.94E3

4.22E3 4.23E3 4.25E3 4.27E3 4.29E3 4.31E3 4.35E3 4.38E3 4.417E3

(T(I),I=1,9)

(P(I),I=1,9)

(VL(I),I=1,9)

(VV(I),I=1,9)

(ENL(I),I=1,9)

(ENV(I),I=1,9)

(SL(I),I=1,9)

(SV(I),I=1,9)

(R(I),I=1,9)

(CVL(I),I=1,9)

(CVP(I),I=1,9)

(CPL(I),I=1,9)

N, DX, Z, WLVO ,P0, XV0 D0, PSR, PI, KK

PROGRAM GM4

```

C   Используются подпрограммы: spline,
C   seval,rkm.
C   Изоэнтروпийное расширение гомогенного
C   потока в сопле Лавала - прямая задача
C   ( задана геометрия канала вдоль сопла и
C   начальная степень сухости-XV0 ).
      DIMENSION B1(10),C1(10)
      DIMENSION P(9),T(9),VL(9),VV(9),R(9),ENL(9),ENV(9),
& SL(9),SV(9),BSL(9),CSL(9),DSL(9),BSV(9),CSV(9),DSV(9),
& CPW(9),CVL(9),CVP(9),BT(9),CT(9),DT(9),BVL(9),
& DVL(9),BVV(9),CVV(9),DVV(9),BR(9),CR(9),
& DR(9),BENL(9),CENL(9),DENL(9),BENV(9),CENV(9),
& DENV(9),BCPW(9),CCPW(9),DCPW(9),BCVL(9),CCVL(9),
& DCVL(9),BCVP(9),CCVP(9),DCVP(9),BP(9),CP(9),DP(9)
      REAL MAX
      OPEN(2,FILE='GM4.DAT')
      OPEN(4,FILE='PRN')
      OPEN(6,FILE='CON')
      OPEN(8,FILE='REZGM4.DAT')
      READ(2,*) N,DX,Z,WLV0,P0,XV0,PSR,PI,KK,
& DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD
      READ(2,*) (T(I),I=1,9)
      READ(2,*) (P(I),I=1,9)
      READ(2,*) (VL(I),I=1,9)
      READ(2,*) (VV(I),I=1,9)
      READ(2,*) (ENL(I),I=1,9)
      READ(2,*) (ENV(I),I=1,9)
      READ(2,*) (SL(I),I=1,9)
      READ(2,*) (SV(I),I=1,9)
      READ(2,*) (R(I),I=1,9)
      READ(2,*) (CVL(I),I=1,9)
      READ(2,*) (CVP(I),I=1,9)
      READ(2,*) (CPW(I),I=1,9)
      Z=ZCC+ZCM+ZCD
      CALL SPLINE(9,P,T,BT,CT,DT)
      CALL SPLINE(9,T,P,BP,CP,DP)
      CALL SPLINE(9,T,VL,BVL,CVL,DVL)
      CALL SPLINE(9,T,VV,BVV,CVV,DVV)
      CALL SPLINE(9,T,ENL,BENL,CENL,DENL)
      CALL SPLINE(9,T,ENV,BENV,CENV,DENV)
      CALL SPLINE(9,T,SL,BSL,CSL,DSL)

```

```

CALL SPLINE(9,T,SV,BSV,CSV,DSV)
CALL SPLINE(9,T,R,BR,CR,DR)
CALL SPLINE(9,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL)
CALL SPLINE(9,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP)
CALL SPLINE(9,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW)
N=4
FC0=PI*DC0**2/4.
CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,P1ENLS,P2ENLS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,P1ENVS,P2ENVS)
CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL,CVLS,P1CVLS,P2CVLS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
CALL
SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
FC=FC0
TS=T0
WLW=WLW0
PS=P0
DC=DC0
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
V=V0
GS=FC0*WLW0/V0
S0=(1.-XV0)*SL0+XV0*SV0
IS=0
B1(1)=P0
B1(2)=WLW0

```



```

      B1(3)=V0
      B1(4)=T0
      K=0
      X=0
      WRITE(8,*)' X    PS    WLW  SA    V    MAX
&TS  DC  XV'
120  X=X+DX
      A=X
      K=K+1
      CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
      CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
      CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
      CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
      CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
      CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
      CALL
SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,P1ENLS,P2ENLS)
      CALL
SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,P1ENVS,P2ENVS)
      CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
      CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
      CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
      CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
      CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
      CALL
SEVAL(9,TS,T,CVL,BCVL,CCVL,DCVL,CVLS,P1CVLS,P2CVLS)
      CALL
SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
      CALL
SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
      CALL
SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
      DO 110 LL=1,4
      TSK=TS+273.
      IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
      IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
      IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
      FC=PI*DC**2/4.
      IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
      IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) PRFC=0.0

```

```

      IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)*
      & (DCSR-DCM)/(2.*ZCD)
      XV=(S0-SLS)/(SVS-SLS)
      V=(1.-XV)*VLS+XV*VVS
      CV=(1.-XV)*CVLS+XV*CVPS
      SA=((V*RS/(VVS-VLS))**2/CV/TSK)**0.5
      MAX=WLV/SA
      C1(1)=-WLV**2*PRFC/(MAX**2-1.)/V/FC
      C1(2)=WLV*PRFC/FC/(MAX**2-1.)
      C1(3)=MAX**2*V*PRFC/FC/(MAX**2-1.)
      C1(4)=-TSK*(VVS-VLS)*WLV**2*PRFC/(MAX**2-1.)/RS/V/FC
110  CALL RKM(A,DX,N,IS,B1,C1)
      PS=B1(1)
      WLW=B1(2)
      V=B1(3)
      TS=B1(4)
      DC=(4.*FC/PI)**0.5
      IF(K.EQ.KK) THEN
      WRITE(8,200) X,PS,WLV,SA,V,MAX,TS,DC,XV
      J=J+1
      IF(J.EQ.10) THEN
      WRITE(8,*)' X   PS   WLW   SA   V   MAX
&TS   DC   XV'
      J=0
      END IF
      K=0
      END IF
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F10.0,4F8.3,F8.2,2F6.3,F10.0)
      IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*)' X=',X,' PS=',PS,' WLW=',WLW,'
SA=',SA,
      & ' GS=',GS,' V=',V,' MAX=',MAX,' TS=',TS,' DC=',DC,' XV=',XV
      IF(K.EQ.KK) K=0.0
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
      STOP
      END

```

Файл исходных данных GM4.DAT

```

4 0.3E-3 0.15 30. 6.E5 0.1 1.E5 3.1416 10
3.E-2 18.72E-3 2.8685E-2 4.E-2 1.E-3 0.105
100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180.

```

1.01E5 1.43E5 1.98E5 2.70E5 3.61E5 4.76E5 6.18E5 7.92E5 10.03E5
 1.04E-3 1.05E-3 1.06E-3 1.07E-3 1.08E-3 1.09E-3 1.1E-3 1.11E-3
 1.13E-3
 1.673 1.21 0.8917 0.6683 0.5087 0.3926 0.3068 0.2426 0.1939
 419.E3 461.E3 503.E3 546.E3 589.E3 632.E3 675.E3 719.E3 763.E3
 2676.E3 2691.E3 2706.E3 2721.E3 2734.E3 2746.E3 2758.E3 2769.E3
 2778.E3
 1.307E3 1.418E3 1.528E3 1.635E3 1.739E3 1.842E3 1.943E3 2.042E3
 2.1395E3
 7.355E3 7.239E3 7.13E3 7.027E3 6.93E3 6.838E3 6.751E3 6.667E3
 6.5858E3
 2257.E3 2230.E3 2202.E3 2175.E3 2145.E3 2114.E3 2082.E3 2050.E3
 2015.E3
 4.22E3 4.23E3 4.24E3 4.26E3 4.28E3 4.3E3 4.33E3 4.35E3 4.38E3
 71.02E3 65.91E3 61.3E3 57.11E3 53.3E3 49.82E3 46.63E3 43.66E3
 40.94E3
 4.22E3 4.23E3 4.25E3 4.27E3 4.29E3 4.31E3 4.35E3 4.38E3 4.417E3
 (T(I),I=1,9)
 (P(I),I=1,9)
 (VL(I),I=1,9)
 (VV(I),I=1,9)
 (ENL(I),I=1,9)
 (ENV(I),I=1,9)
 (SL(I),I=1,9)
 (SV(I),I=1,9)
 (R(I),I=1,9)
 (CVL(I),I=1,9)
 (CVP(I),I=1,9)
 (CPL(I),I=1,9)
 N, DX, Z, WLV0 ,P0, XV0, PSR, PI, KK
 DC0, DCM, DCSR ZCC ZCM ZCD

PROGRAM GM1QT

C Расширение гомогенного потока с трением и
 C подводом теплоты в сопле Лавая - прямая задача
 C (задана геометрия сопла и начальная
 C степень сухости -XV0).
 DIMENSION B(10),C(10)
 REAL MAX
 VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
 VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.)+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
 RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2

```

SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
SL(A)=0.087725+0.0131875*(A-273.)-9.9375E-6*(A-273.)**2
SP(A)=8.764128-0.0165849*(A-273.)+2.49062E-5*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='GM1QT.DAT')
OPEN (8,FILE='REZGM1QT.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,WLV0,P0,XV0,PSR,PI,KK,
& DC0,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,QW
Z=ZCC+ZCM+ZCD
N=4
FC0=PI*DC0**2/4.
T0=5.677*P0**0.25+273.
ROV0=1.213E-5*P0**0.9375
ROL0=RO(T0)
VL0=1./ROL0
VV0=1./ROV0
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
S0=(1.-XV0)*SL(T0)+XV0*SP(T0)
FC=FC0
T=T0
ROL=ROL0
ROV=ROV0
WLV=WLV0
V=V0
P=P0
DC=DC0
IS=0
B(1)=P
B(2)=WLV
B(3)=V
B(4)=T
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X P WL V SA V MAX T
& DC XV PV'
120 X=X+DX
A=X
K=K+1
DO 110 LL=1,4

```

```

ROV=1.213E-5*P**0.9375
IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
FC=PI*DC**2/4.
IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) PRFC=0.0
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)*
& (DCSR-DCM)/(2.*ZCD)
ROL=RO(T)
VV=1./ROV
VL=1./ROL
SW=SL(T)
SV=SP(T)
XV=(S0-SW)/(SV-SW)
V=(1.-XV)*VL+XV*VV
ROSM=1./V
CV=(1.-XV)*CVL(T)+XV*CVV(T)
VISW=VISL(T)
VISV=VISP(T)
VISSM=(1.-XV)*VISW+XV*VISV
R=SQV(T)
SA=((V*R/(VV-VL))**2/CV/T)**0.5
MAX=WLV/SA
PV=P0/((P0/PSR-1.)*(A/Z)**2+1.)
DIPDV=R/(VV-VL)
DIPDP=CV*T*(VV-VL)/R+V
REN=WLV*DC*ROSM/VISSM
CF=0.079/(REN**0.25)
OPR=DIPDP-DIPDV*V**2/(WLV**2)-V
C(1)=(4.*QW*V/WLV/DC+2.*CF*(V*DIPDV+WLV**2)/DC-
& V*DIPDV*PRFC/FC)/OPR
C(2)=-V*C(1)/WLV-2.*CF*WLV/DC
C(3)=V*C(2)/WLV+V*PRFC/FC
C(4)=(VV-VL)*T*C(1)/R
110 CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
P=B(1)
WLV=B(2)
V=B(3)

```

```

T=B(4)
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(8,200) X,P,WLV,SA,V,MAX,T,DC,XV,PV
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X P WLW SA V MAX T
& DC XV PV'
J=0
END IF
K=0
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
200 FORMAT(F6.3,F10.0,4F8.3,F8.2,2F6.3,F10.0)
STOP
END

```

Файл исходных данных GM1Q.DAT

```

4 0.3E-3 0.15 30. 6.E5 0.1 1.E5 3.1416 10
3.E-2 18.72E-3 2.8685E-2 4.E-2 1.E-3 0.105 2.E6

```

```

N, DX, Z, WLW0 ,P0, XV0, PSR, PI, KK
DC0, DCM, DCSR ZCC ZCM ZCD QW

```

Идентификаторы программы GM1_CILS

DC – диаметр канала

FC – площадь поперечного сечения канала

CWV – скорость гомогенного потока

V – удельный объем смеси

TS, PS – текущие значения температуры и давления потока

PROGRAM GM1_CILS

C Расширение гомогенного

C потока с трением в цилиндрическом канале

C (определяется длина канала и критическое

C давление на срезе при заданном расходе,

C начальная степень сухости-XV0 задается).

C Используются подпрограммы: spline, seval,rkm.

```

DIMENSION B1(10),C1(10)

```

```

DIMENSION P(9),T(9),VL(9),VV(9),R(9),ENL(9),ENV(9),

```

```

& SL(9),SV(9),BSL(9),CSL(9),DSL(9),BSV(9),CSV(9),DSV(9),

```

```

& CPW(9),CVW(9),CVP(9),BT(9),CT(9),DT(9),BVL(9),

```

```

& CVL(9),DVL(9),BVV(9),CVV(9),DVV(9),BR(9),CR(9),

```

```

& DR(9),BENL(9),CENL(9),DENL(9),BENV(9),CENV(9),

```

```

& DENV(9),BCPW(9),CCPW(9),DCPW(9),BCVW(9),CCVW(9),
& DCVW(9),BCVP(9),CCVP(9),DCVP(9),BP(9),CP(9),DP(9)
REAL M
OPEN(2,FILE='GM1_CILS.DAT')
OPEN(8,FILE='REZGM1_C.DAT')
READ(2,*) N,DX,GKR,P0,XV0,PI,KK,DC0
READ(2,*) (T(I),I=1,9)
READ(2,*) (P(I),I=1,9)
READ(2,*) (VL(I),I=1,9)
READ(2,*) (VV(I),I=1,9)
READ(2,*) (ENL(I),I=1,9)
READ(2,*) (ENV(I),I=1,9)
READ(2,*) (SL(I),I=1,9)
READ(2,*) (SV(I),I=1,9)
READ(2,*) (R(I),I=1,9)
READ(2,*) (CVW(I),I=1,9)
READ(2,*) (CVP(I),I=1,9)
READ(2,*) (CPW(I),I=1,9)
CALL SPLINE(9,P,T,BT,CT,DT)
CALL SPLINE(9,T,P,BP,CP,DP)
CALL SPLINE(9,T,VL,BVL,CVL,DVL)
CALL SPLINE(9,T,VV,BVV,CVV,DVV)
CALL SPLINE(9,T,ENL,BENL,CENL,DENL)
CALL SPLINE(9,T,ENV,BENV,CENV,DENV)
CALL SPLINE(9,T,SL,BSL,CSL,DSL)
CALL SPLINE(9,T,SV,BSV,CSV,DSV)
CALL SPLINE(9,T,R,BR,CR,DR)
CALL SPLINE(9,T,CVW,BCVW,CCVW,DCVW)
CALL SPLINE(9,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP)
CALL SPLINE(9,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW)
N=3
FC0=PI*DC0**2/4.
CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,
P1ENLS,P2ENLS)
CALL SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,
P1ENVS,P2ENVS)

```

```

CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
CALL SEVAL(9,TS,T,CVW,BCVW,CCVW,DCVW,
CVWS,P1CVWS,P2CVWS)
CALL SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,
DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
CALL SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,
CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
CALL SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,
CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
V0=(1.-XV0)*VL0+XV0*VV0
CWV0=GKR*V0/FC0
FC=FC0
T0K=T0+273.
TS=T0
CWV=CWV0
PS=P0
DC=DC0
V=V0
S0=(1.-XV0)*SL0+XV0*SV0
IS=0
B1(1)=PS
B1(2)=CWV
B1(3)=TS
K=0
X=0
120 X=X+DX
A=X
K=K+1
CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
CALL SEVAL(9,P0,P,T,BT,CT,DT,T0,P1T0,P2T0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VL,BVL,CVL,DVL,VL0,P1VL0,P2VL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,VV,BVV,CVV,DVV,VV0,P1VV0,P2VV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,
P1ENLS,P2ENLS)
CALL SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,
P1ENVS,P2ENVS)

```



```

CALL SEVAL(9,TS,T,SL,BSL,CSL,DSL,SLS,P1SLS,P2SLS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SL,BSL,CSL,DSL,SL0,P1SL0,P2SL0)
CALL SEVAL(9,TS,T,SV,BSV,CSV,DSV,SVS,P1SVS,P2SVS)
CALL SEVAL(9,T0,T,SV,BSV,CSV,DSV,SV0,P1SV0,P2SV0)
CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
CALL SEVAL(9,T0,T,R,BR,CR,DR,R0,P1RS,P2RS)
CALL SEVAL(9,TS,T,CVW,BCVW,CCVW,DCVW,CVWS,
P1CVWS,P2CVWS)
CALL SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,
P1CVPS,P2CVPS)
CALL SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,
P1CP0W,P2CP0W)
CALL SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,
P1CPSW,P2CPSW)
DO 110 LL=1,4
TSK=TS+273.
FC=PI*DC**2/4.
CPI=(CP0W+CPSW)/2.
CWVS=(2.*(CPI*T0K*(1.-TSK*(1.+ALOG(T0K/TSK)))/T0K+
& XV0*R0*(1.-TSK/T0K)/CPI/T0K)+CWV0**2/2.))**0.5
FIC=CWV/CWVS
XVS=(S0-SLS)/(SVS-SLS)
V=CWV*FC0/GKR
XV=(V-VLS)/(VVS-VLS)
CV=(1.-XV)*CVWS+XV*CVPS
SA=((V*RS/(VVS-VLS))**2/CV/TSK)**0.5
M=CWV/SA
SAD=V*(RS/(VVS-VLS))**2/CV/PS/TSK
VISW=(613.-4.227*(TSK-273.)+9.22E-3*(TSK-273.)**2)*1.E-6
VISV=(8.35+3.42E-2*(TSK-273.)+2.E-5*(TSK-273.)**2)*1.E-6
VISSM=VISW*VISV/((1.-XV)*VISV+XV*VISW)
RE=CWV*DC/V/VISSM
CRF=1.84/RE**0.2
CFF=CRF/4.
OTL=X/DC
1(1)=2.*CFF*CWV**2*(1.+CWV**2/SA/((CV*TSK)**0.5))/V/DC
& /(M**2-1.)
C1(2)=-V*C1(1)/CWV-2*CFF*CWV/DC
C1(3)=TSK*(VVS-VLS)*C1(1)/RS
110 CALL RKM(A,DX,N,IS,B1,C1)
PS=B1(1)
CWV=B1(2)

```

```

    TS=B1(3)
    PRINT*, ' X=',X,' PS=',PS,' CWV=',CWV,' DC=',DC,' XV=',XV
& , ' SA=',SA,' M=',M
    DC=(4.*FC/PI)**0.5
    IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X,' PS=',PS,' CWV=',CWV,'
SA=',SA,
& ' GKR=',GKR,' V=',V,' M=',M,' TS=',TS,' DC=',DC,' XV=',XV,
& ' CRF=',CRF,' CFF=',CFF,' FIC=',FIC,
& ' CWVS=',CWVS,' XVS=',XVS,' OTL=',OTL
    IF(K.EQ.KK) K=0.0
    IF((1./C1(1)).LT.0) GOTO 120
    IF((1./C1(1)).EQ.0) GOTO 130
130 STOP
    END
    SUBROUTINE SPLINE(N,X,Y,B,C,D)
    DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
    NM1=N-1
    IF(N.LT.2) RETURN
    IF(N.LT.3) GO TO 50
    D(1)=X(2)-X(1)
    C(2)=(Y(2)-Y(1))/D(1)
    DO 10 I=2,NM1
    D(I)=X(I+1)-X(I)
    B(I)=2.0*(D(I-1)+D(I))
    C(I+1)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)
    C(I)=C(I+1)-C(I)
10 CONTINUE
    B(1)=-D(1)
    B(N)=-D(N-1)
    C(1)=0.0
    C(N)=0.0
    IF(N.EQ.3) GO TO 15
    C(1)=C(3)/(X(4)-X(2))-C(2)/(X(3)-X(1))
    C(N)=C(N-1)/(X(N)-X(N-2))-C(N-2)/(X(N-1)-X(N-3))
    C(1)=C(1)*D(1)**2/(X(4)-X(1))
    C(N)=-C(N)*D(N-1)**2/(X(N)-X(N-3))
15 DO 20 I=2,N
    T=D(I-1)/B(I-1)
    B(I)=B(I)-T*D(I-1)
    C(I)=C(I)-T*C(I-1)
20 CONTINUE
    C(N)=C(N)/B(N)

```

```

DO 30 IB=1,NM1
I=N-IB
C(I)=(C(I)-D(I)*C(I+1))/B(I)
30  CONTINUE
B(N)=(Y(N)-Y(NM1))/D(NM1)+D(NM1)*(C(NM1)+2.0*C(N))
DO 40 I=1,NM1
B(I)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)-D(I)*(C(I+1)+2.0*C(I))
D(I)=(C(I+1)-C(I))/D(I)
C(I)=3.0*C(I)
40  CONTINUE
C(N)=3.0*C(N)
D(N)=D(N-1)
RETURN
50  B(1)=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))
C(1)=0.0
D(1)=0.0
B(2)=B(1)
C(2)=0.0
D(2)=0.0
RETURN
END
SUBROUTINE SEVAL(N,U,X,Y,B,C,D,S,SP,SPP)
DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
DATA I/1/
IF(I.GE.N) I=1
IF(U.LT.X(I)) GO TO 10
IF(U.LE.X(I+1)) GO TO 30
10  I=1
J=N+1
20  K=(I+J)/2
IF(U.LT.X(K)) J=K
IF(U.GE.X(K)) I=K
IF(J.GT.I+1) GO TO 20
30  DX=U-X(I)
S=Y(I)+DX*(B(I)+DX*(C(I)+DX*D(I)))
SP=B(I)+DX*(2.*C(I)+3.*DX*D(I))
SPP=2.*C(I)+6.*DX*D(I)
RETURN
END
SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B1,C1)
DIMENSION F(10),G(40),C1(10),B1(10)
IS=IS+1

```

```

      GOTO(10,30,60,80),IS
10   E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B1(I)
      G(4*I-3)=C1(I)*DX
20   B1(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30   DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C1(I)*DX
40   B1(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50   A=E+DX/2.
      GOTO 100
60   DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C1(I)*DX
70   B1(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80   DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C1(I)*DX
      B1(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90   B1(I)=(B1(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100  RETURN
      END

```

Файл исходных данных GM1_CILS.DAT

```

N   DX GKR P0 XV0  PI  KK DC0
3  0.3E-3 0.56 6.E5 0.05 3.1416 10 2.E-2
100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180.
1.01E5 1.43E5 1.98E5 2.70E5 3.61E5 4.76E5 6.18E5 7.92E5 10.03E5
1.04E-3 1.05E-3 1.06E-3 1.07E-3 1.08E-3 1.09E-3 1.1E-3 1.11E-3
1.13E-3
1.673 1.21 0.8917 0.6683 0.5087 0.3926 0.3068 0.2426 0.1939
419.E3 461.E3 503.E3 546.E3 589.E3 632.E3 675.E3 719.E3 763.E3
2676.E3 2691.E3 2706.E3 2721.E3 2734.E3 2746.E3 2758.E3 2769.E3
2778.E3
1.307E3 1.418E3 1.528E3 1.635E3 1.739E3 1.842E3 1.943E3 2.042E3
2.1395E3
7.355E3 7.239E3 7.13E3 7.027E3 6.93E3 6.838E3 6.751E3 6.667E3
6.5858E3
2257.E3 2230.E3 2202.E3 2175.E3 2145.E3 2114.E3 2082.E3 2050.E3
2015.E3

```

4.22E3 4.23E3 4.24E3 4.26E3 4.28E3 4.3E3 4.33E3 4.35E3 4.38E3
 71.02E3 65.91E3 61.3E3 57.11E3 53.3E3 49.82E3 46.63E3 43.66E3
 40.94E3
 4.22E3 4.23E3 4.25E3 4.27E3 4.29E3 4.31E3 4.35E3 4.38E3 4.417E3
 (T(I),I=1,9)
 (P(I),I=1,9)
 (VL(I),I=1,9)
 (VV(I),I=1,9)
 (ENL(I),I=1,9)
 (ENV(I),I=1,9)
 (SL(I),I=1,9)
 (SV(I),I=1,9)
 (R(I),I=1,9)
 (CVW(I),I=1,9)
 (CVP(I),I=1,9)
 (CPW(I),I=1,9)

Приложение №3

LAV2A

Идентификаторы программы

WG- скорость газа
 WK- скорость капель (частиц)
 TG,TK- температура газа и капель, соответственно
 GG,GK- расход газа и капель, соответственно
 ROG,ROK- плотность газа и капель, соответственно
 CG- удельная изобарная теплоемкость газа
 CK- удельная теплоемкость капли
 DK-диаметр капли
 U- отношение $\dot{G}_K / \dot{G}_Г$
 LAMG, VISG - коэффициенты теплопроводности и динамической
 вязкости газа
 DW- разность WG-WK
 REK- число Рейнольдса по диаметру и скорости капли относительно
 газа
 REG- число Рейнольдса по диаметру канала и скорости газа
 CX- коэффициент сопротивления капли
 DSTAR- сила сопротивления одной капли, D^*
 PR- число Прандтля газа
 ALFA- коэффициент теплоотдачи между газом и каплей
 DT- разность TG-TK
 SK- коэффициент скольжения $w_K / w_Г$

ROA- аналитическое значение плотности газа

PROGRAM LAV2A

```

C   Программа позволяет выполнить расчет
C   сопла Лавалья, работающего на воздухе
C   с частицами (каплями), в одномерной
C   постановке. Поток неравновесный, капли
C   обмениваются теплотой с несущим потоком,
C   массоотдача от капель отсутствует.
C   Задача обратная - задан закон распределе-
C   ния статического давления вдоль сопла.
REAL LAMG0,LAMG,MAXG0
DIMENSION B(10),C(10)
OPEN (2,FILE='LAV2A.DAT')
OPEN (6,FILE='REZL2A.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,P0,WG0,WK0,TG0,PI
READ(2,*) TK0,GG0,GK0,ROK0,CPG0,LAMG0,VISG0
READ(2,*) DK0,CK0,CVG0,PSR,UGC,AMG,KK
WRITE(6,*) ' X P WG WK TG TK
& ROG DSM WSMD FIN'
ROG0=P0*AMG/TG0/UGC
FSM0=GG0/ROG0/WG0+GK0/ROK0/WK0
GSM0=GG0+GK0
GGOT=GG0/GSM0
GKOT=GK0/GSM0
ADG=CPG0/CVG0
DSM0=(4.*FSM0/PI)**0.5
U0=GK0/GG0
SAG0=(ADG*UGC*TG0/AMG)**0.5
MAXG0=WG0/SAG0
TSTG0=TG0*(1.+(ADG-1.)*MAXG0**2/2.)
PSTG0=P0*(TSTG0/TG0)**(ADG/(ADG-1.))
ROSTG0=ROG0*(TSTG0/TG0)**(1./(ADG-1.))
TKC0=TK0-273.
TKCST0=TKC0+WK0**2/CK0/2.
TSTK0=TKCST0+273.
CSM0=CPG0*GGOT+CK0*GKOT
TSMST0=(GGOT*CPG0*TSTG0+GKOT*CK0*TSTK0)/
& CSM0
ADSM=(CPG0+U0*CK0)/(CVG0+U0*CK0)
N=6
P=P0

```

```

WG=WG0
WK=WK0
TG=TG0
TK=TK0
ROG=ROG0
IS=0
B(1)=P0
B(2)=WG0
B(3)=WK0
B(4)=TG0
B(5)=TK0
B(6)=ROG0
K=0
X=0
120 X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
VISG=17.2E-6+0.05E-6*(TG-273.)-0.03E-9*(TG-273.)**2
LAMG=23.8E-3+8.4189E-5*(TG-273.)-4.2908E-8*(TG-273.)**2
TSM0=(GGOT*CPG0*TG0+GKOT*CK0*TK0)/CSM0
TSM=(GGOT*CPG0*TG+GKOT*CK0*TK)/CSM0
PST0=P0*(TSMST0/TSM0)**(ADSM/(ADSM-1.))
ESMS=(1.+U0)*CSM0*TSMST0*(1.-(P/PST0)
& **((ADSM-1.)/ADSM))
WSMS=(2.*ESMS)**0.5
ESMD=(WG**2+U0*WK**2)/2.
WSMD=(WG**2+U0*WK**2)**0.5
EFN=ESMD/ESMS
FIN=EFN**0.5
DW=WG-WK
REK=ABS(DW)*DK0*ROG/VISG
CX=24./REK+4.4/(REK**0.5)+0.32
DSTAR=CX*PI*DK0**2*ROG*ABS(DW)*DW/8.
PR=VISG*CPG0/LAMG
ALFA=(2.+0.6*REK**0.5*PR**0.33)*LAMG/DK0
DT=TK-TG
SK=WK/WG
FSM=GG0/ROG/WG+GK0/ROK0/WK
DSM=(4.*FSM/PI)**0.5
REG=WG*DSM*ROG/VISG
CF=0.079/(REG**0.25)
TW=CF*ROG*WG**2/2.

```

```

PA=P0/((P0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
ROA=PA*AMG/TG/UGC
DRO=ROA-ROG
C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*X/(Z**2*((P0/PSR-1.)
& *(X/Z)**2+1.))**2)
C(2)=-C(1)/WG/ROG-6.*DSTAR*U0/PI/(DK0**3)/ROK0/WK-
& TW*PI*DSM/GG0
C(3)=-C(1)/WK/ROK0+6.*DSTAR/PI/(DK0**3)/ROK0/WK
C(4)=6.*ALFA*DT*U0/DK0/ROK0/WK/CPG0-WG*C(2)/CPG0
C(5)=-6.*ALFA*DT/DK0/ROK0/WK/CK0-WK*C(3)/CK0
C(6)=AMG/UGC/TG*(C(1)-P*C(4)/TG)
CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
P=B(1)
WG=B(2)
WK=B(3)
TG=B(4)
TK=B(5)
110  ROG=B(6)
      EPSRO=DRO*100./ROA
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,200)
X,P,WG,WK,TG,TK,ROG,DSM,WSMD,FIN
      IF(K.EQ.KK)K=0
      IF(X.LT.Z)GOTO 120
      STOP
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,2F6.0,3F8.3,F6.3)
      END
      SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
      IS=IS+1
      GOTO(10,30,60,80),IS
10   E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20   B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30   DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40   B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50   A=E+DX/2.
      GOTO 100
60   DO 70 I=1,N

```



```

      G(4*I-1)=C(I)*DX
70   B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80   DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90   B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100  RETURN
      END
      Файл исходных данных LAV2A.DAT
      6 0.3E-3 0.15 6.E5 3. 2.5 426. 3.1416
      429. 0.15 0.9 926. 1003. 35.7E-3 24.15E-6
      2.E-5 4300. 716.7 1.E5 8314. 29. 10
      N DX Z P0 WG0 WK0 TG0 PI
      TK0 GG0 GK0 ROK0 CPG0 LAMG0 VISG0
      DK0 CK0 CVG0 PSR UGC AMG KK

```

X	P	WG	WK	TG	TK	ROG	DSM	WSMD	FIN
.003	598683.	12.052	6.984	429.	429.	4.869	.058	20.977	.866
.006	595002.	21.872	13.155	429.	429.	4.840	.044	38.954	.850
.009	589044.	31.534	19.644	429.	429.	4.792	.036	57.533	.851
.012	580945.	40.998	26.257	429.	429.	4.727	.032	76.274	.854
.015	570885.	50.253	32.914	429.	429.	4.647	.029	95.002	.858
.018	559075.	59.294	39.563	428.	429.	4.552	.027	113.610	.862
.021	545752.	68.113	46.168	428.	429.	4.445	.026	132.017	.865
.024	531161.	76.702	52.702	428.	428.	4.328	.024	150.160	.868
.027	515552.	85.055	59.141	428.	428.	4.202	.024	167.990	.870
.030	499168.	93.168	65.469	428.	428.	4.070	.023	185.466	.872
.033	482238.	101.038	71.671	428.	428.	3.934	.022	202.556	.875
.036	464972.	108.662	77.737	427.	428.	3.795	.022	219.238	.876
.039	447561.	116.040	83.658	427.	428.	3.655	.022	235.493	.878
.042	430169.	123.174	89.429	427.	428.	3.514	.021	251.311	.880
.045	412939.	130.068	95.047	427.	428.	3.375	.021	266.686	.881
.048	395988.	136.724	100.510	427.	427.	3.238	.021	281.615	.882
.051	379411.	143.148	105.818	426.	427.	3.104	.021	296.100	.883
.054	363285.	149.346	110.971	426.	427.	2.974	.021	310.147	.885
.057	347666.	155.324	115.971	426.	427.	2.847	.021	323.762	.886
.060	332595.	161.090	120.822	426.	427.	2.725	.021	336.953	.886
.063	318101.	166.650	125.526	425.	427.	2.608	.021	349.733	.887
.066	304199.	172.011	130.087	425.	426.	2.495	.021	362.111	.888

.069	290896.	177.182	134.510	425.	426.	2.387	.021	374.101	.889
.072	278191.	182.169	138.799	425.	426.	2.284	.022	385.715	.890
.075	266077.	186.981	142.957	425.	426.	2.186	.022	396.966	.890
.078	254541.	191.624	146.990	424.	426.	2.092	.022	407.868	.891
.081	243567.	196.106	150.903	424.	426.	2.003	.022	418.434	.891
.084	233138.	200.433	154.699	424.	426.	1.918	.022	428.677	.892
.087	223232.	204.613	158.384	424.	425.	1.837	.023	438.610	.892
.090	213829.	208.651	161.961	424.	425.	1.761	.023	448.245	.893
.093	204905.	212.554	165.435	423.	425.	1.688	.023	457.595	.893
.096	196439.	216.329	168.811	423.	425.	1.619	.024	466.670	.894
.099	188408.	219.980	172.092	423.	425.	1.553	.024	475.484	.894
.102	180790.	223.513	175.282	423.	425.	1.491	.024	484.046	.895
.105	173562.	226.934	178.384	423.	424.	1.432	.024	492.367	.895
.108	166705.	230.247	181.404	423.	424.	1.376	.025	500.457	.895
.111	160198.	233.457	184.342	422.	424.	1.323	.025	508.326	.896
.114	154021.	236.569	187.204	422.	424.	1.272	.025	515.982	.896
.117	148157.	239.587	189.993	422.	424.	1.224	.026	523.436	.896
.120	142587.	242.515	192.710	422.	424.	1.179	.026	530.694	.897
.123	137295.	245.356	195.359	422.	424.	1.135	.026	537.765	.897
.126	132265.	248.116	197.943	422.	423.	1.094	.027	544.657	.897
.129	127482.	250.796	200.465	421.	423.	1.055	.027	551.376	.898
.132	122932.	253.400	202.926	421.	423.	1.018	.027	557.930	.898
.135	118602.	255.932	205.330	421.	423.	.982	.028	564.325	.898
.138	114479.	258.395	207.677	421.	423.	.948	.028	570.568	.898
.141	110552.	260.791	209.972	421.	423.	.916	.028	576.663	.899
.144	106809.	263.122	212.215	421.	423.	.885	.029	582.618	.899
.147	103240.	265.393	214.408	421.	422.	.856	.029	588.437	.899
.150	99835.	267.604	216.553	421.	422.	.828	.029	594.125	.899

LAV2B

Идентификаторы программы

GGOT- \dot{G}_T / \dot{G}

GKOT- \dot{G}_K / \dot{G}

TKC- температура капли , T_K , °C

TSTARCK- температура торможения капли , T^*_K , °C

TSTARCKK- температура торможения капли , T^*_K , K

TSTARSM- температура торможения смеси , $T^*_{см}$, K

ADSM-показатель изоэнтропии смеси FK- площадь поперечного сечения, занятая каплями , f_K

FG- площадь поперечного сечения, занятая несущим потоком, f_T

ESMS- удельная кинетическая энергия смеси при изоэнтропийном расширении, Дж/кг

ESMD- действительная удельная кинетическая энергия смеси, Дж/кг

EFN- отношение ESMD/ ESMS

WSMS- скорость смеси при изоэнтропийном расширении

OPR- определитель системы дифференциальных уравнений

Файл исходных данных LAV2B.DAT

```
6 0.3E-3 0.15 6.E5 30. 25. 426. 3.1416
429. 0.015 0.3 926. 1003.
4.E-5 4300. 716.7 8314. 29. 10
7.7773E-3 1.2E-2 4.E-2 2.E-3 0.105
```

```
N DX Z P0 WG0 WK0 TG0 PI
TK0 GG0 GK0 ROK0 CPG0
DK0 CK0 CVG0 UGC AMG KK
DNM DNSR ZNC ZNM ZND
```

PROGRAM LAV2B

C Расчет сопла Лавая, работающего

C на газе с частицами. Задача прямая.

```
REAL LAMG0,LAMG,MAXG0,MAXG,LAM
```

```
DIMENSION B(10),C(10)
```

```
VIS(A)=17.2E-6+0.05E-6*(A-273.)-0.03E-9*(A-273.)**2
```

```
LAM(A)=23.8E-3+8.4189E-5*(A-273.)-4.2908E-8*(A-273.)**2
```

```
OPEN (2,FILE='LAV2B.DAT')
```

```
OPEN (4,FILE='CON')
```

```
OPEN (6,FILE='REZL2B.DAT')
```

```
WRITE(6,*)' X P WG WK TG TK ROG
```

```
& DN WSMS FIN MAXG'
```

```
READ(2,*) N,DX,Z,P0,WG0,WK0,TG0,PI
```

```
READ(2,*) TK0,GG0,GK0,ROK0,CPG0
```

```
READ(2,*) DK0,CK0,CVG0,UGC,AMG,KK
```

```
READ(2,*) DNM,DNSR,ZNC,ZNM,ZND
```

```
Z=ZNC+ZNM+ZND
```

```
LAMG0=LAM(TG0)
```

```
VISG0=VIS(TG0)
```

```
ROG0=P0*AMG/TG0/UGC
```

```
FN0=GG0/ROG0/WG0+GK0/ROK0/WK0
```

```
GSM0=GG0+GK0
```

```
GGOT=GG0/GSM0
```

```
GKOT=GK0/GSM0
```

```
ADG=CPG0/CVG0
```

```
DN0=(4.*FN0/PI)**0.5
```

```

U0=GK0/GG0
SAG0=(ADG*UGC*TG0/AMG)**0.5
MAXG0=WG0/SAG0
TSTG0=TG0*(1.+(ADG-1.)*MAXG0**2/2.)
PSTG0=P0*(TSTG0/TG0)**(ADG/(ADG-1.))
ROSTG0=ROG0*(TSTG0/TG0)**(1./(ADG-1.))
TKC0=TK0-273.
TKCST0=TKC0+WK0**2/CK0/2.
TSTK0=TKCST0+273.
CSM0=CPG0*GGOT+CK0*GKOT
TSMST0=(GGOT*CPG0*TSTG0+GKOT*CK0*TSTK0)/
& CSM0
TSM0=(GGOT*CPG0*TG0+GKOT*CK0*TK0)/CSM0
ADSM=(CPG0+U0*CK0)/(CVG0+U0*CK0)
N=6
P=P0
WG=WG0
WK=WK0
TG=TG0
TK=TK0
ROG=ROG0
IS=0
B(1)=P0
B(2)=WG0
B(3)=WK0
B(4)=TG0
B(5)=TK0
B(6)=ROG0
K=0
X=0
120 X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
LAMG=LAM(TG)
VISG=VIS(TG)
SAG=(ADG*UGC*TG/AMG)**0.5
MAXG=WG/SAG
FK=GK0/WK/ROK0
FG=GG0/WG/ROG
PST0=P0*(TSMST0/TSM0)**(ADSM/(ADSM-1.))
ESMS=(1.+U0)*CSM0*TSMST0*(1.-(P/PST0)
& **((ADSM-1.)/ADSM))

```

```

WSMS=(2.*ESMS)**0.5
ESMD=(WG**2+U0*WK**2)/2.
WSMD=((WG**2+U0*WK**2)/(1.+U0))**0.5
EFN=ESMD/ESMS
FIN=EFN**0.5
DW=WG-WK
REK=ABS(DW)*DK0*ROG/VISG
CX=24./REK+4.4/(REK**0.5)+0.32
DSTAR=CX*PI*DK0**2*ROG*ABS(DW)*DW/8.
PR=VISG*CPG0/LAMG
ALFA=(2.+0.6*REK**0.5*PR**0.33)*LAMG/DK0
DT=TK-TG
SK=WK/WG
IF(X.LT.ZNC) DN=DN0-(DN0-DNM)*X/ZNC
IF(X.GT.ZNC.AND.X.LE.(ZNC+ZNM)) DN=DNM
IF(X.GT.(ZNC+ZNM)) DN=DNM+(DNSR-DNM)*(X-
(ZNC+ZNM))/ZND
FN=PI*DN**2/4.
IF(X.LT.ZNC) PRFN=-PI*(DN0-(DN0-DNM)*X/ZNC)*(DN0-
DNM)/2./ZNC
IF(X.GE.ZNC.AND.X.LE.(ZNC+ZNM)) PRFN=0.0
IF(X.GT.(ZNC+ZNM)) PRFN=PI*(DNM+(DNSR-DNM)*(X-
(ZNC+ZNM))/ZND)*
& (DNSR-DNM)/(2.*ZND)
REG=WG*DN*ROG/VISG
CF=0.079/(REG**0.25)
TW=CF*ROG*WG**2/2.
OPRS=MAXG**2-GK0*WG**3*ROG**2/(GG0*WK**3*
& ROK0**2)-1.
C(1)=(6.*ROG*DSTAR*WG**2*(U0*(ADG-1.)*WG
& *WK/(SAG**2)+U0*WK/WG-FK/FG)/(PI*DK0**3*
& ROK0*WK**2)+TW*PI*DN*(1.+(ADG-1.)*MAXG**2)/
& FG-ROG*WG**2*PRFN/FG+6.*ROG*ALFA*DT*U0*
& (ADG-1.)*MAXG**2/(DK0*ROK0*WK))/OPRS
C(2)=-C(1)/WG/ROG-6.*DSTAR*U0/PI/(DK0**3)/ROK0/WK-
& TW*PI*DN/GG0
C(3)=-C(1)/WK/ROK0+6.*DSTAR/PI/(DK0**3)/ROK0/WK
C(4)=6.*ALFA*DT*U0/DK0/ROK0/WK/CPG0-WG*C(2)/CPG0
C(5)=-6.*ALFA*DT/DK0/ROK0/WK/CK0-WK*C(3)/CK0
C(6)=ROG*(C(1)/P-C(4)/TG)
CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
P=B(1)

```

```

      WG=B(2)
      WK=B(3)
      TG=B(4)
      TK=B(5)
110   ROG=B(6)
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,200)
X,P,WG,WK,TG,TK,ROG,DN,WSMS,FIN,MAXG
      IF(K.EQ.KK)K=0
      IF(X.LT.Z)GOTO 120
      STOP
200   FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,2F6.0,3F8.3,2F6.3)
      END
      SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
      IS=IS+1
      GOTO(10,30,60,80),IS
10    E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20    B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30    DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40    B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50    A=E+DX/2.
      GOTO 100
60    DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70    B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80    DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90    B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100   RETURN
      END

```

Файл результатов расчета

X	P	WG	WK	TG	TK	ROG	DN	WSM	FIN	MAXG
.003	597928.	32.081	25.662	429.	429.	4.867	.012	119.367	.998	.077

.006	595161.	34.205	26.525	429.	429.	4.841	.011	124.047	.995	.082
.009	591616.	36.530	27.584	429.	429.	4.811	.011	129.831	.991	.088
.012	587184.	39.115	28.840	429.	429.	4.775	.011	136.758	.986	.094
.015	581724.	42.017	30.304	429.	429.	4.731	.010	144.910	.979	.101
.018	575048.	45.301	31.990	429.	429.	4.677	.010	154.381	.972	.109
.021	566906.	49.055	33.920	429.	429.	4.611	.010	165.334	.964	.118
.024	556953.	53.401	36.127	429.	429.	4.531	.010	177.997	.956	.129
.027	544709.	58.507	38.658	429.	429.	4.432	.009	192.725	.947	.141
.030	529484.	64.624	41.582	429.	429.	4.309	.009	210.006	.937	.156
.033	510250.	72.149	45.000	429.	429.	4.153	.009	230.627	.927	.174
.036	485380.	81.766	49.067	428.	429.	3.953	.008	255.837	.915	.197
.039	452063.	94.814	54.046	428.	429.	3.684	.008	287.932	.902	.229
.042	412752.	104.990	59.800	428.	429.	3.363	.008	324.385	.886	.253
.045	380572.	109.016	64.793	428.	428.	3.100	.008	353.749	.875	.263
.048	353995.	112.585	69.034	428.	428.	2.884	.008	378.006	.869	.272
.051	331355.	115.820	72.749	428.	428.	2.700	.008	398.867	.866	.279
.054	311655.	118.790	76.073	428.	428.	2.540	.008	417.274	.864	.287
.057	294250.	121.544	79.091	428.	428.	2.398	.008	433.822	.862	.293
.060	278691.	124.116	81.863	428.	428.	2.272	.009	448.900	.861	.300
.063	264654.	126.534	84.433	428.	428.	2.158	.009	462.786	.861	.305
.066	251894.	128.818	86.833	428.	428.	2.054	.009	475.688	.860	.311
.069	240222.	130.986	89.086	428.	428.	1.959	.009	487.747	.860	.316
.072	229490.	133.051	91.213	428.	428.	1.872	.009	499.088	.860	.321
.075	219575.	135.026	93.229	428.	428.	1.791	.009	509.806	.860	.326
.078	210378.	136.922	95.147	428.	428.	1.716	.009	519.974	.860	.331
.081	201817.	138.748	96.978	428.	428.	1.646	.009	529.665	.860	.335
.084	193821.	140.512	98.731	428.	428.	1.581	.009	538.922	.860	.339
.087	186330.	142.224	100.414	427.	428.	1.520	.010	547.795	.860	.343
.090	179291.	143.891	102.034	427.	428.	1.463	.010	556.331	.860	.347
.093	172660.	145.520	103.596	427.	428.	1.409	.010	564.553	.860	.351
.096	166396.	147.121	105.107	427.	428.	1.358	.010	572.505	.860	.355
.099	160463.	148.701	106.571	427.	428.	1.310	.010	580.206	.860	.359
.102	154828.	150.269	107.992	427.	428.	1.264	.010	587.693	.861	.363
.105	149461.	151.837	109.376	427.	428.	1.220	.010	594.985	.861	.367
.108	144336.	153.415	110.726	427.	428.	1.179	.010	602.115	.861	.371
.111	139425.	155.017	112.046	427.	427.	1.139	.011	609.099	.861	.374
.114	134703.	156.659	113.341	427.	427.	1.100	.011	615.975	.861	.378
.117	130147.	158.358	114.615	427.	427.	1.063	.011	622.760	.861	.383
.120	125732.	160.139	115.872	427.	427.	1.027	.011	629.498	.862	.387
.123	121433.	162.029	117.117	427.	427.	.992	.011	636.213	.862	.392
.126	117223.	164.064	118.357	427.	427.	.958	.011	642.954	.862	.396
.129	113072.	166.291	119.596	427.	427.	.924	.011	649.767	.862	.402
.132	108949.	168.770	120.843	427.	427.	.891	.011	656.711	.862	.408
.135	104815.	171.584	122.107	426.	427.	.857	.012	663.865	.862	.415
.138	100620.	174.849	123.399	426.	427.	.823	.012	671.334	.862	.423
.141	96304.	178.732	124.735	426.	427.	.789	.012	679.261	.862	.432
.144	91780.	183.492	126.136	426.	427.	.752	.012	687.854	.862	.444
.147	86922.	189.548	127.630	425.	427.	.713	.012	697.436	.862	.459

LAV3

Идентификаторы программы

JV- поток массы пара от капли, j_v
 IVTK- энтальпия пара, $i''_{\text{П}}(T_{\text{К}})$
 IVTGV- энтальпия пара, $i_{\text{П}}(T_{\text{СМ}})$
 IV- оператор-функция, энтальпия сухого насыщенного пара в функции от температуры
 GGV- расход газопаровой смеси
 GCGV- газовая постоянная газопаровой смеси
 ROGV, PGV, WGV, TGV- плотность, давление, скорость и температура газопаровой смеси
 AMGV- мольная масса газопаровой смеси
 CPGV- удельная изобарная теплоемкость газопаровой смеси
 PVS- давление пара $p''(T_{\text{К}})$
 DIFV- коэффициент диффузии системы пар-воздух
 SC- число Шмидта
 BETA- коэффициент массоотдачи от пара к газу
 FSM- площадь поперечного сечения канала, занятая газопаровой смесью и жидкой фазой
 CPK- удельная теплоемкость капли
 PV- парциальное давление пара

PROGRAM LAV3A

```

C   Расчет сопла Лаваля, работающего
C   на газокапельном потоке
C   (обратная задача).
REAL LAMG,JV,IVTK,IVTGV
DIMENSION B(10),C(10)
OPEN (2,FILE='LAV3.DAT')
OPEN (4,FILE='CON')
OPEN (6,FILE='REZL3.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,P0,PV,PVS,WGV,WK,PI
READ(2,*) TGV,TK,ROGV,GG,GV,GK,ROK
READ(2,*) CPG,DK,CPK,UGC,AMG,AMV,DSM
READ(2,*) KK,PSD,PSR
N=7
PGV=P0
IS=0
B(1)=P0
B(2)=GV
B(3)=DK
B(4)=WGV

```



```

B(5)=WK
B(6)=TK
B(7)=TGV
J=0
K=0
X=0
WRITE(6,*)' X   PGV   WGV   WK   SK   TGV   TK
&  ROGV DSM   DK'
120  X=X+DX
     K=K+1
     DO 110 LL=1,4
     GGV=GG+GV
     AMGV=GGV*AMV*AMG/(GV*AMG+GG*AMV)
     PV=GV*AMGV*PGV/GGV/AMV
     GCGV=UGC*(GG/AMG+GV/AMV)/GGV
     CPG=7.*UGC/AMG/2.
     CPV=5.*UGC/AMV/2.
     CPGV=(CPG*GG+CPV*GV)/GGV
     PVS=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*TK-7821.541/TK-
&  11.48776*ALOG(TK))
     DW=WGV-WK
     VISG=17.2E-6+0.05E-6*(TGV-273.)-0.03E-9*(TGV-273.)**2
     LAMG=23.8E-3+8.4189E-5*(TGV-273.)-4.2908E-8*(TGV-
273.)**2
     ROGV=PGV/TGV/GCGV
     DIFV=22.E-6*(TGV/273.)**PSD*1.013E5/PGV
     SC=VISG/ROGV/DIFV
     REK=ABS(DW)*DK*ROGV/VISG
     BETA=(2.+0.6*REK**0.5*SC**0.33)*DIFV/DK
     JV=BETA*AMV*(PVS/TK-PV/TGV)/UGC
     ROK=999.9-0.1475*(TK-273.)-2.695E-3*(TK-273.)**2
     CX=24./REK+4.4/(REK**0.5)+0.32
     DSTAR=CX*PI*DK**2*ROGV*ABS(DW)*DW/8.
     FSM=GGV/ROGV/WGV+GK/ROK/WK
     DSM=(4.*FSM/PI)**0.5
     PR=VISG*CPGV/LAMG
     ALFA=(2.+0.6*REK**0.5*PR**0.33)*LAMG/DK
     DT=TK-TGV
     SK=WK/WGV
     REGV=WGV*DSM*ROGV/VISG
     CF=0.079/(REGV**0.25)
     TW=CF*ROGV*WGV**2/2.

```

```

IVTK=(2501.+2.04*(TK-273.)-29.E-4*(TK-273.)**2)*1.E3
IVTGV=(2501.+2.04*(TGV-273.)-29.E-4*(TGV-273.)**2)*1.E3
C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*X/(Z**2*((P0/PSR-1.)
& *(X/Z)**2+1.)**2)
C(2)=6.*JV*GK/WK/ROK/DK
C(3)=-2.*JV/ROK/WK
C(4)=-
(GGV*C(1)/WGV/ROGV+6.*DSTAR*GK/PI/(DK**3)/ROK/WK+
& TW*PI*DSM+DW*C(2))/GGV
C(5)=-C(1)/WK/ROK+6.*DSTAR/PI/(DK**3)/ROK/WK
C(6)=-((IVTK-CPK*(TK-273.))*JV+ALFA*DT)*6./WK/ROK/DK/
& CPK-WK*C(5)/CPK
C(7)=-((IVTGV-CPK*(TK-273.)+WGV**2/2.-WK**2/2.)*C(2)
& +GK*(CPK*C(6)+WK*C(5)))/CPGV/GGV-WGV*C(4)/CPGV
CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
PGV=B(1)
GV=B(2)
DK=B(3)
WGV=B(4)
WK=B(5)
TK=B(6)
110  TGV=B(7)
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(6,200) X,PGV,WGV,WK,SK,TGV,TK,ROGV,DSM,DK
J=J+1
IF (J.EQ.10) THEN
WRITE(6,*)' X   PGV   WGV   WK   SK   TGV   TK
&   ROGV DSM   DK'
      END IF
      K=0
      END IF
IF(X.LT.Z)GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,F6.3,2F8.2,F8.3,F6.3,E10.3)
STOP
END
Файл исходных данных LAV3.DAT
7 0.3E-3 0.15 6.E5 0.3E5 5.81E5 30. 25. 3.1416
426. 429. 4.815 0.29 0.01 0.15 914.
1003. 2.E-5 4300. 8314. 29. 18. 5.142E-2
10 1.5 1.E5
N DX  Z  P0  PV  PVS  WGV WK  PI
TGV TK0 ROGV GG  GV  GK  ROK

```

CPG0 DK CPK UGC AMG AMV DSM
KK PSD PSR

LAV3B

Идентификаторы программы

MGV- число Маха газопаровой смеси
KGV- показатель изэнтропы газопаровой смеси
NDR- число капель в единицу времени , \dot{n}
CVGV- изохорная удельная теплоемкость газопаровой смеси
SAGV- скорость звука в газопаровой смеси
FGV- площадь поперечного сечения канала, занятая газопаровой смесью
RES,FRIC,MASS,GEOM- воздействия на поток, определяемые соответственно силами сопротивления капель, трения потока о стенку, массопереносом от капель к газу и геометрией канала

PROGRAM LAV3B

C Расчет сопла Лавая, работающего
C на газе с испаряющимися каплями, прямая задача.
REAL LAM,LAMG,JV,IVTK,IVTGV,IV,MGV,KGV,NDR,MASS
DIMENSION B(10),C(10)
VIS(A)=17.2E-6+0.05E-6*(A-273.)-0.03E-9*(A-273.)**2
LAM(A)=23.8E-3+8.4189E-5*(A-273.)-4.2908E-8*(A-273.)**2
IV(A)=(2501.+2.04*(A-273.)-29.E-4*(A-273.)**2)*1.E3
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
P(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A-
& 11.48776*ALOG(A))
OPEN (2,FILE='LAV3B.DAT')
OPEN (6,FILE='REZL3B.DAT')
READ(2,*) N,DX,P0,WGV0,WK0,PI
READ(2,*) TGV0,TK0,GG0,GV0,GK0
READ(2,*) DK0,CPK,UGC,AMG,AMV,KK,PSD
READ(2,*) DCM,DCSR,ZNC,ZNM,ZND
Z=ZNC+ZNM+ZND
GGV0=GG0+GV0
GCGV0=UGC*(GG0/AMG+GV0/AMV)/GGV0
ROGV0=P0/TGV0/GCGV0
ROK0=RO(TK0)
FCM0=GGV0/ROGV0/WGV0+GK0/ROK0/WK0

```

DCM0=(4.*FCM0/PI)**0.5
N=7
PGV=P0
WGV=WGV0
WK=WK0
TGV=TGV0
TK=TK0
GG=GG0
GV=GV0
GK=GK0
ROGV=ROGV0
DK=DK0
IS=0
B(1)=PGV
B(2)=GV
B(3)=DK
B(4)=WGV
B(5)=WK
B(6)=TK
B(7)=TGV
J=0
K=0
X=0
WRITE(6,*)' X   PGV   WGV   WK   SK   TGV   TK
&  ROGV DC   DK   GK   GGV   PVS'
```

```

120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      GGV=GG+GV
      AMGV=GGV*AMV*AMG/(GV*AMG+GG*AMV)
      PV=GV*AMGV*PGV/GGV/AMV
      GCGV=UGC*(GG/AMG+GV/AMV)/GGV
      CPG=7.*UGC/AMG/2.
      CPV=5.*UGC/AMV/2.
      CPGV=(CPG*GG+CPV*GV)/GGV
      PVS=P(TK)
      DW=WGV-WK
      LAMG=LAM(TGV)
      VISG=VIS(TGV)
      ROGV=PGV/TGV/GCGV
      DIFV=22.E-6*(TGV/273.)**PSD*1.013E5/PGV
```

SC=VISG/ROGV/DIFV
 REK=ABS(DW)*DK*ROGV/VISG
 BETA=(2.+0.6*REK**0.5*SC**0.33)*DIFV/DK
 JV=BETA*AMV*(PVS/TK-PV/TGV)/UGC
 ROK=RO(TK)
 CX=24./REK+4.4/(REK**0.5)+0.32
 DSTAR=CX*PI*DK**2*ROGV*ABS(DW)*DW/8.
 PR=VISG*CPGV/LAMG
 ALFA=(2.+0.6*REK**0.5*PR**0.33)*LAMG/DK
 DT=TK-TGV
 SK=WK/WGV
 DC0=DCM0
 IF(X.LT.ZNC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZNC
 IF(X.GT.ZNC.AND.X.LE.(ZNC+ZNM)) DC=DCM
 IF(X.GT.(ZNC+ZNM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
 (ZNC+ZNM))/ZND
 FN=PI*DC**2/4.
 IF(X.LT.ZNC) PRFN=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZNC)*(DC0-
 DCM)/2./ZNC
 IF(X.GE.ZNC.AND.X.LE.(ZNC+ZNM)) PRFN=0.0
 IF(X.GT.(ZNC+ZNM)) PRFN=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
 (ZNC+ZNM))/ZND)*
 & (DCSR-DCM)/(2.*ZND)
 REGV=WGV*DC*ROGV/VISG
 CF=0.079/(REGV**0.25)
 TW=CF*ROGV*WGV**2/2.
 IVTK=IV(TK)
 IVTGV=IV(TGV)
 CVGV=CPGV-GCGV
 KGV=CPGV/CVGV
 SAGV=(KGV*GCGV*TGV)**0.5
 MGV=WGV/SAGV
 GK=GV0+GK0-GV
 FGV=GGV/ROGV/WGV
 FK=FN-FGV
 NDR=6*GK0/(PI*DK0**3*ROK0)
 OPR=MGV**2-
 GK*WGV**3*ROGV**2/(GGV*WK**3*ROK**2)-1.
 RES=6*DSTAR*ROGV*WGV*(GK*((KGV-
 1.)*MGV**2+1.)/GGV-FK*WGV/
 & (FGV*WK))/(PI*DK**3*ROK*WK)
 FRIC=TW*ROGV*WGV*PI*DC*((KGV-1.)*MGV**2+1.)/GGV

```

      MASS=((KGV-1.)*(IV(TK)-IV(TGV)))/(SAGV**2)-
ROGV*WGV/(ROK*WK)
      & +DW*((KGV-
1.)**MGV**2+1.)/WGV+1.)*PI*DK**2*NDR*JV*ROGV*WGV**2/
      & GGV/WK
      GEOM=ROGV*WGV**2*PRFN/FGV
      C(1)=(RES+FRIC+MASS-GEOM)/OPR
      C(2)=6.*JV*GK/WK/ROK/DK
      C(3)=-2.*JV/ROK/WK
      C(4)=-
(GGV*C(1)/WGV/ROGV+6.*DSTAR*GK/PI/(DK**3)/ROK/WK+
      & TW*PI*DC+DW*C(2))/GGV
      C(5)=-C(1)/WK/ROK+6.*DSTAR/PI/(DK**3)/ROK/WK
      C(6)=-((IVTK-CPK*(TK-273.))*JV+ALFA*DT)*6./WK/ROK/DK/
      & CPK-WK*C(5)/CPK
      C(7)=-((IVTGV-CPK*(TK-273.)+WGV**2/2.-WK**2/2.)*C(2)
      & +GK*(CPK*C(6)+WK*C(5)))/CPGV/GGV-WGV*C(4)/CPGV
      CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      PGV=B(1)
      GV=B(2)
      DK=B(3)
      WGV=B(4)
      WK=B(5)
      TK=B(6)
110  TGV=B(7)
      IF(K.EQ.KK) THEN
      WRITE(6,200)
X,PGV,WGV,WK,SK,TGV,TK,ROGV,DC,DK,GK,GGV,PVS
      J=J+1
      IF (J.EQ.10) THEN
      WRITE(6,*)' X   PGV   WGV   WK   SK   TGV   TK
      &   ROGV  DC   DK   GK   GGV   PVS'
      END IF
      K=0
      END IF
      IF(X.LT.Z)GOTO 120
200
FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,F6.3,2F8.2,F8.3,F6.3,E10.3,2F8.3,F10.0)
STOP
END
Файл исходных данных LAV3B.DAT
7 0.3E-3 6.E5 30. 25. 3.1416

```

426. 429. 0.29 0.01 0.15
 2.E-5 4300. 8314. 29. 18. 10 1.5
 20.103E-3 26.34E-3 4.E-2 2.E-3 0.105

N DX P0 WG0 WK0 PI
 TGV0 TK0 GG0 GV0 GK0
 DK0 CPK UGC AMG AMV KK PSD
 DCM DCSR ZCC ZCM ZCD

Результаты расчета

X	PGV	WGV	WK	SK	TGV	TK	ROGV	DN
DK								
3.	599.124	34.517	27.043	.783	422.22	389.25	4.746	49.15
	.195E-04							
6.	598.187	38.666	29.669	.767	416.58	377.73	4.771	46.80
	.193E-04							
9.	597.029	43.241	32.689	.756	411.30	373.31	4.809	44.44
	.192E-04							
12.	595.534	48.529	36.127	.744	406.61	371.40	4.843	42.08
	.191E-04							
15.	593.549	54.782	40.077	.732	402.50	370.53	4.870	39.73
	.191E-04							
18.	590.854	62.307	44.680	.717	398.84	370.09	4.888	37.37
	.191E-04							
21.	587.107	71.518	50.128	.701	395.51	369.84	4.895	35.02
	.191E-04							
24.	581.752	83.011	56.686	.683	392.35	369.63	4.886	32.66
	.190E-04							
27.	573.850	97.696	64.733	.663	389.15	369.39	4.857	30.31
	.190E-04							
30.	561.695	117.064	74.845	.639	385.57	369.05	4.796	27.95
	.190E-04							
33.	541.889	143.838	87.959	.612	380.99	368.50	4.681	25.60
	.190E-04							
36.	506.463	184.014	105.807	.575	373.81	367.57	4.457	23.24
	.190E-04							
72.	198.354	413.176	307.092	.743	316.08	345.88	2.059	21.89
	.189E-04							
75.	191.378	418.594	313.667	.749	314.39	345.02	1.997	22.06
	.189E-04							

78. 184.858 423.753 319.868 .755 312.76 344.19 1.939 22.24
.189E-04

81. 178.744 428.679 325.738 .760 311.21 343.39 1.884 22.42
.189E-04

84. 172.995 433.393 331.313 .764 309.71 342.63 1.832 22.60
.189E-04

87. 167.575 437.914 336.624 .769 308.27 341.88 1.783 22.78
.189E-04

90. 162.454 442.259 341.696 .773 306.88 341.16 1.737 22.95
.189E-04

93. 157.605 446.440 346.552 .776 305.54 340.47 1.692 23.13
.189E-04

96. 153.006 450.471 351.209 .780 304.24 339.79 1.650 23.31
.189E-04

99. 148.636 454.363 355.685 .783 302.98 339.13 1.609 23.49
.189E-04

102. 144.478 458.124 359.994 .786 301.76 338.49 1.571 23.67
.189E-04

105. 140.516 461.764 364.148 .789 300.58 337.86 1.534 23.85
.189E-04

108. 136.735 465.290 368.159 .791 299.43 337.25 1.498 24.02
.189E-04

111. 133.124 468.710 372.036 .794 298.31 336.66 1.464 24.20
.189E-04

114. 129.669 472.029 375.789 .796 297.22 336.07 1.431 24.38
.189E-04

117. 126.362 475.254 379.426 .798 296.17 335.50 1.400 24.56
.189E-04

120. 123.193 478.389 382.953 .801 295.14 334.94 1.369 24.74
.189E-04

123. 120.153 481.439 386.378 .803 294.13 334.40 1.340 24.91
.189E-04

126. 117.235 484.409 389.705 .804 293.15 333.86 1.312 25.09
.189E-04

129. 114.430 487.302 392.942 .806 292.20 333.34 1.285 25.27
.189E-04

132. 111.734 490.123 396.092 .808 291.27 332.82 1.259 25.45
.189E-04

135. 109.139 492.875 399.161 .810 290.36 332.31 1.233 25.63
.189E-04

138. 106.640 495.561 402.152 .812 289.47 331.82 1.209 25.81
.189E-04

141. 104.232 498.184 405.069 .813 288.60 331.33 1.185 25.98
.189E-04

144. 101.911 500.746 407.917 .815 287.75 330.85 1.162 26.16
.189E-04

147. 99.671 503.251 410.697 .816 286.91 330.37 1.140 26.34
.189E-04

LAV7

Идентификаторы программы

LAMD- коэффициент теплопроводности капли, λ_k

MU1, MU2, MU3- корни характеристического уравнения

TETA1, TETA2, TETA3- безразмерные разности температур,
соответствующие первым трем корням характеристического
уравнения μ_1, μ_2, μ_3

TDAV- температура капли, определенная по уравнению энергии
парожидкостной смеси

B1- эмпирический коэффициент в формуле $\chi = b_1 p^{-0,56}$

DTDV- перепад температуры между поверхностью капли и паром

CPD- теплоемкость капли

GDV- расход парожидкостной смеси

RD- радиус капли

PPV- производная dp/dx

SQ- удельная теплота парообразования

CAP- коэффициент массоотдачи χ

AD- коэффициент температуропроводности

ALFA- коэффициент теплоотдачи между каплей и паром

BIO- число Био

DJDV- результирующий поток массы между каплей и паром

PROGRAM LAV7

C Расчет высоковлажного

C потока с учетом нестационарного охлаждения

C капель, обратная задача.

DIMENSION MU(3),B(10),C(10)

REAL IV,IVTV,ISTAR0,IVTV0,LAMD,MU

TET(A)=2.*(SIN(A)-A*COS(A))*SIN(A)*EXP(-A**2*FURC)/(A-
SIN(A)*

& COS(A))/A

ROL(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2

IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1E3

```

CPL(A)=4275.5-1.22*(A-273)+0.59823E-2*(A-273)**2
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273)-6.26E-3*(A-273)**2)*1E3
OPEN(2,FILE='L7.DAT')
READ(2,*)
N,DX,Z,PV0,TDAV0,TV0,WV0,WD0,GV0,GD0,DD,PSR,
& UGC,PI,B1,AMV,KK,T0,DMU0,EPS,LAMD
CLOSE(2)
OPEN(8,FILE='REZL7.DAT')
N=4
DTDV0=TDAV0-TV0
GDV0=GD0+GV0
IVTV0=IV(TV0)
CPDT0=CPL(TDAV0)
ISTAR0=GV0*(IVTV0+WV0**2/2.)+GD0*(CPDT0*(TDAV0-
273.)+
& WD0**2/2.)
RD=DD/2.
PV=PV0
WV=WV0
WD=WD0
TDAV=TDAV0
DTDV=DTDV0
TV=TV0
GD=GD0
GV=GV0
CPDT=CPDT0
IS=0
B(1)=GV
B(2)=DD
B(3)=WV
B(4)=WD
WRITE(8,*)' X    PV    GV    GD    DD    WV
& WD  TV  FN  DN  XV  FINE  FINI  ALFA'
GCV=UGC/AMV
J=0
K=0
X=0.
120  X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
GD=GDV0-GV
RD=DD/2.

```

```

ROD=ROL(TDAV)
PV=PVO/((PVO/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
PPV=(-2.*PVO*(PVO/PSR-1.)*X)/(Z**2*((PVO/PSR-1.)*
& (X/Z)**2+1.))**2)
ROV=1.21E-5*PV**0.9375
TV=5.677*PV**0.25+273.
SQ=SQV(TV)
VISV=(8.35+3.42E-2*(TV-273.)+2E-5*(TV-273.))**2)*1E-6
RED=ABS(WV-WD)*DD*ROV/VISV
IF(RED.GT.0.AND.RED.LE.1.) CX=24./RED
IF(RED.GT.1.AND.RED.LE.390.) CX=24./(RED**0.667)
IF(RED.GT.390.) CX=0.45
DSTAR=CX*PI*DD**2*ROV*(WV-WD)*ABS(WV-WD)/8.
FN=GV/ROV/WV+GD/ROD/WD
DN=(4.*FN/PI)**0.5
WVD=((GV*WV**2+GD*WD**2)/(GV+GD))**0.5
CPDT=CPL(TDAV)
SWVD=(2.*CPDT*((T0-TV)-TV*ALOG(T0/TV)))**0.5
FINE=WVD/SWVD
FINI=(GD*WD+GV*WV)/(GD+GV)/SWVD
XV=GV/(GV+GD)
REV=WV*DN*ROV/VISV
CF=0.079/(REV**0.25)
TW=CF*ROV*WV**2/2.
CAP=B1/(PV**0.56)
IVTV=IV(TV)
TDAV=((ISTAR0-GV*(IVTV+WV**2/2.))/GD-
WD**2/2.)/CPDT+273.
AD=LAMD/CPDT/ROD
ALFA=SQ**2*CAP*ROV/TV/(2.*PI*GCV*TV)**0.5
BIO=ALFA*RD/LAMD
TAUF=DX/WD
FURC=AD*TAUF/(RD**2)
MU(1)=2.
MU(2)=5.
MU(3)=8.
DO 20 I=1,3
DMU=DMU0
25  MU(I)=MU(I)+DMU
Y1=MU(I)/(BIO-1.)
Y2=-SIN(MU(I))/COS(MU(I))
IF(ABS(Y1-Y2).LT.EPS) GOTO 20

```

```

IF(ABS(Y1)-ABS(Y2)) 9,9,10
9   GOTO 25
10  MU(I)=MU(I)-DMU
    DMU=DMU/2.
    GOTO 25
20  CONTINUE
    TETA1=TET(MU(1))
    TETA2=TET(MU(2))
    TETA3=TET(MU(3))
    TETA=TETA1+TETA2+TETA3
    DTDV=(TDAV-TV)*TETA
    DJDV=ALFA*DTDV/SQ
    C(1)=6.*DJDV*GD/WD/ROD/DD
    C(2)=-2.*DJDV/ROD/WD
    C(3)=- (PPV*GV/WV/ROV+6.*DSTAR*GD/WD/PI/DD**3/ROD+
    . TW*PI*DN+(WV-WD)*C(1))/GV
    C(4)=-PPV/ROD/WD+6.*DSTAR/PI/DD**3/ROD/WD
110 CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
    GV=B(1)
    DD=B(2)
    WV=B(3)
    WD=B(4)
    IF(K.EQ.KK) THEN

WRITE(8,200)X,PV,GV,GD,DD,WV,WD,TV, FN, DN, XV, FINE, FINI, A
LFA
    K=0
    J=J+1
    IF(J.EQ.10) THEN
        WRITE(8,*)' X    PV    GV    GD    DD    WV
& WD   TV   FN   DN   XV   FINE  FINI  ALFA'
        J=0
    END IF
    END IF
    IF(X.LT.Z) GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,E10.3,2F8.3,F6.0,E10.3,F7.4,3F7.3,
&    F10.0)
    END

Файл исходных данных L7.DAT
4 .1E-3 .152 6.5E5 438. 435. 15. 10. 12.E-3 .4 2.E-5 1E5
8314. 3.1416 110. 18. 10. 438. 373. 1E-2 2E-2 .68 3.

```

LAV4

Идентификаторы программы

DD- диаметр капли
 PSR- давление на срезе
 WV,WD- скорости пара и капель
 GV,GD- расход пара и капель
 ROD,ROV- плотность пара и капель
 TV,TD- температура пара и капель
 IVTD- энтальпия $i''_П(T_K)$
 IVTV- энтальпия $i''_П(T_П)$
 WVDI- скорость смеси из уравнения количества движения
 WVDE- скорость смеси из кинетической энергии смеси
 SWVD- скорость смеси при изоэнтропийном расширении
 PPV- производная dp_v/dx
 FINE- коэффициент скорости, отношение WVDE/ SWVD
 FINI- коэффициент скорости, отношение WVDI/ SWVD
 XV- степень сухости пара
 PRV- число Прандтля пара
 LAMV- коэффициент теплопроводности пара
 PVTД- давление $p_П(T_K)$
 CAPC,CAPИ- коэффициенты конденсации и испарения
 JVI- плотность потока пара, испаряющегося с поверхности капли
 JVC- плотность потока пара, конденсирующегося на поверхности капли
 RJV- результирующая плотность потока пара
 CPD- удельная изобарная теплоемкость c_{pK}

PROGRAM LAV4

```

C   Расчет высоковлажного потока,
C   обратная задача
DIMENSION B(10),C(10)
REAL IVTD,IVTV,JVI,JVC,LAMV,IV,LAM
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1E3
ROL(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
CPL(A)=4275.5-1.22*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.)+2E-5*(A-273.)**2)*1E-6
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1E-2
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
OPEN(2,FILE='L4.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,PV0,TD0,TV0,WV0,WD0,GV0,GD0,DD,PSR,

```

```

& UGC,PI,B1,AMV,KK,T0
CLOSE(2)
OPEN(4,FILE='REZL4.DAT')
N=5
GDV0=GD0+GV0
ROV=1.213E-5*PV0**0.9375
ROD=ROL(TD0)
WV=WV0
WD=WD0
TD=TD0
TV=TV0
GD=GD0
GV=GV0
IS=0
B(1)=GV
B(2)=DD
B(3)=WV
B(4)=WD
B(5)=TD
CPD=CPL(TD0)
GCV=UGC/AMV
J=0
K=0
X=0.
WRITE(4,*)' X   PV   GV   GD   DD   WV   WD
& TV TD  FN   DN  XV  FINE FINI'
120 X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
GD=GDV0-GV
ROD=ROL(TD)
PV=PV0/((PV0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
PPV=-(.2*PV0*(PV0/PSR-1.)*X)/(Z**2*((PV0/PSR-1.)*
& (X/Z)**2+1.))**2)
ROV=1.21E-5*PV**0.9375
TV=5.677*PV**0.25+273.
VISV=VIS(TV)
RED=ABS(WV-WD)*DD*ROV/VISV
IF(RED.GT.0.AND.RED.LE.1.) CX=24./RED
IF(RED.GT.1.AND.RED.LE.390.) CX=24./RED**0.667
IF(RED.GT.390.) CX=0.45
DSTAR=CX*PI*DD**2*ROV*(WV-WD)*ABS(WV-WD)/8.

```

```

FN=GV/ROV/WV+GD/ROD/WD
DN=(4.*FN/PI)**0.5
WVDE=((GV*WV**2+GD*WD**2)/(GV+GD))**0.5
SWVD=(2.*CPD*(T0-TV-TV*ALOG(T0/TV)))**0.5
FINE=WVDE/SWVD
SWDI=(GD*WD+GV*WV)/(GD+GV)
FINI=SWDI/SWVD
XV=GV/(GV+GD)
REV=WV*DN*ROV/VISV
CF=0.079/REV**0.25
TW=CF*ROV*WV**2/2.
PRV=PR(TV)
LAMV=LAM(TV)
ALFA=(2+0.6*RED**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD
PVTD=((TD-273)/5.677)**4
CAPC=B1/PV**0.56
CAPI=B1/PV**0.56
JVI=PVTD*CAPI/(1.-0.4*CAPI)/(2.*GCV*PI*TD)**0.5
JVC=PV*CAPC/(1.-0.4*CAPC)/(2.*GCV*PI*TV)**0.5
RJV=JVI-JVC
IVTD=IV(TD)
CPD=CPL(TD)
IVTV=IV(TV)
C(1)=6.*RJV*GD/WD/ROD/DD
C(2)=-2.*RJV/ROD/WD
C(3)=-((PPV*GV/WV/ROV+6.*DSTAR*GD/WD/PI/DD**3/ROD+
& TW*PI*DN+(WV-WD)*C(1))/GV
C(4)=-PPV/ROD/WD+6.*DSTAR/PI/DD**3/ROD/WD
C(5)=-((ALFA*(TD-TV)+JVI*(IVTD+WD**2/2.))-
JVC*(IVTV+WV**2/2.))*
& 6./WD/ROD/DD/CPD+(CPD*(TD-
273)+WD**2/2.)*C(1)/GD/CPD-
& C(4)*WD/CPD
110 CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
GV=B(1)
DD=B(2)
WV=B(3)
WD=B(4)
TD=B(5)
IF(K.EQ.KK) THEN
WRITE(4,200)
X,PV,GV,GD,DD,WV,WD,TV,TD,FN,DN,XV,FINE,FINI

```

```

K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(4,*)' X   PV   GV   GD   DD   WV   WD
& TV TD   FN   DN   XV   FINE FINI'
J=0
      END IF
    ENDIF
  IF(X.LT.Z) GOTO 120
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F6.3,E10.3,2F8.3,2F6.0,E10.3,2F6.3,
& 2F7.3)
END

```

Файл исходных данных L4.DAT
5 .1E-3 .146 6.5E5 437. 435. 15. 10. 12.E-3 .4 1.5E-5 1.E5
8314. 3.1416 35. 18. 10 438.

```

N DX  Z  PV0 TD0 TV0 WV0 WD0 GV0 GD0 DD  PSR
UGC  PI  B1 AMV KK  T0 TSR

```

CONJT4

Идентификаторы программы

G1- расход пара
G2,WD2,TD2,DD2- расход, скорость, температура и диаметр горячих капель
G3,WD3,TD3,DD3- расход, скорость, температура и диаметр холодных капель
GSM- расход смеси
GCR- критический расход через сопло
YILTW- удельная энтальпия воды на входе в сопло
YITD3- удельная энтальпия холодных капель
IDST3- энтальпия торможения для холодных капель
NV- поток капель
PPROV- производная плотности по давлению

PROGRAM CONJT4

C Расчет конической камеры смешения, структура потока
C парок капельная (к двухфазному пароводяному потоку
C подмешивается холодная вода), задача прямая.
DIMENSION B(10),C(10)


```

REAL ISM0,ILTL0,IVTD3,IVTV,IDST3,IDST30,
& LAMV,LAM,IV,JVC,JVI2,JVI3,NV2,NV3
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
OPEN (2,FILE='CJ4.DAT')
OPEN (8,FILE='REZCJ4.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,GCR,PV0,XV0,G30,WV0,WD20,WD30,
& TW0,TD20,TD30,DD20,DD30,UGC,AMV,PI,KK,B3,DSMM
N=10
G10=GCR*XV0
G20=GCR*(1.-XV0)
GSM0=G10+G20+G30
ROV0=1.213E-5*PV0**0.9375
ROD20=RO(TD20)
ROD30=RO(TD30)
FSM0=G10/ROV0/WV0+G20/ROD20/WD20+G30/ROD30/WD30
DSM0=(4.*FSM0/PI)**0.5
WSM0=((G10*WV0**2+G20*WD20**2+G30*WD30**2)/GSM0)**0.
5
YILTW0=YILTL(TW0)
YITD30=YILTL(TD30)
TV0=5.677*PV0**0.25+273.

ISM0=(IV(TV0)+WV0**2/2.)*G10+(YILTL(TD20)+WD20**2/2.)*
& G20+(YITD30+WD30**2/2.)*G30
IDST30=YITD30+WD30**2/2.
IDST3=IDST30
G2=G20
G3=G30
WV=WV0
WD2=WD20
WD3=WD30
DD2=DD20
DD3=DD30
TD2=TD20

```

```

TD3=TD30
GSM=GSM0
PV=PV0
IS=0
B(1)=PV
B(2)=G2
B(3)=DD2
B(4)=WD2
B(5)=G3
B(6)=DD3
B(7)=WD3
B(8)=WV
B(9)=IDST3
B(10)=TD3
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X   PV   G1   G2   G3   WV   WD
&2   WD3   DD2   DD3   TD2  TD3   GSM  DSM  FISM
&   ROSM  ROSGR'
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      DSM=DSM0-(DSM0-DSMM)*X/Z
      FSM=PI*DSM**2/4.
      PRFSM=-PI*(DSM0-(DSM0-DSMM)*X/Z)*(DSM0-DSMM)/2./Z
      TV=5.677*PV**0.25+273.
      ROV=1.213E-5*PV**0.9375
      ROD2=RO(TD2)
      ROD3=RO(TD3)
      G1=GSM0-G2-G3
      WSM=((G1*WV**2+G2*WD2**2+G3*WD3**2)/GSM0)**0.5
      FISM=WSM/WSM0
      IVTV=IV(TV)
      IVTD3=IV(TD3)
      CP2=CPL(TD2)
      CP3=CPL(TD3)
      YITD3=YILTL(TD3)
      TD2=((ISM0-(IVTV+WV**2/2.)*G1-(YITD3
& +WD3**2/2.)*G3)/G2-WD2**2/2.)/CP2+273.
      VISV=VIS(TV)
      RED2=ABS(WV-WD2)*DD2*ROV/VISV

```

IF(RED2.GT.0.AND.RED2.LE.1.) CX2=24./RED2
 IF(RED2.GT.1.AND.RED2.LE.390.) CX2=24./(RED2**0.667)
 IF(RED2.GT.390.) CX2=0.45
 DSTA2=CX2*PI*DD2**2*ROV*(WV-WD2)*ABS(WV-WD2)/8.
 RED3=ABS(WV-WD3)*DD3*ROV/VISV
 IF(RED3.GT.0.AND.RED3.LE.1.) CX3=24./RED3
 IF(RED3.GT.1.AND.RED3.LE.390.) CX3=24./(RED3**0.667)
 IF(RED3.GT.390.) CX3=0.45
 DSTA3=CX3*PI*DD3**2*ROV*(WV-WD3)*ABS(WV-WD3)/8.
 REV=WV*DSM*ROV/VISV
 CF=0.079/(REV**0.25)
 TW=CF*ROV*WV**2/2.
 PRV=PR(TV)
 LAMV=LAM(TV)
 ALFA3=(2.+0.6*RED3**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD3
 PVT2=((TD2-273.)/5.677)**4
 PVT3=((TD3-273.)/5.677)**4
 CAPI2=B3/(PVT2**0.56)
 CAPI3=B3/(PVT3**0.56)
 CAPC=B3/(PV**0.56)
 GCV=UGC/AMV
 JVI2=PVT2*CAPI2/(2.*GCV*PI*TD2)**0.5
 JVI3=PVT3*CAPI3/(2.*GCV*PI*TD3)**0.5
 JVC=PV*CAPC/(2.*GCV*PI*TV)**0.5
 RJV2=JVI2-JVC
 RJV3=JVI3-JVC
 ROSM=ROV+G3*(1.-ROV/ROD3)/FSM/WD3+G2*(1.-
 ROV/ROD2)/FSM/WD2
 ROSGR=(1.-PI*2.**0.5/6.)*(ROD2*G2+ROD3*G3)/(G2+G3)
 FV=G1/WV/ROV
 NV2=6.*G2/(PI*DD2**3*ROD2*WD2*FSM)
 NV3=6.*G3/(PI*DD3**3*ROD3*WD3*FSM)
 PPROV=8.805129E4*PV**62.5E-3
 C(1)=WV/(WV**2/PPROV-
 (G2/G1)*(WV/WD2)**3*(ROV/ROD2)**2-
 & (G3/G1)*(WV/WD3)**3*(ROV/ROD3)**2-1.)/FV*(-
 FSM*(DSTA2*NV2*
 & (WV**2*ROV/(WD2**2*ROD2)-
 1.)+DSTA3*NV3*(WV**2*ROV/(WD3**2*
 & ROD3)-1.))/WV-PI*FSM*((WV*ROV/(WD2*ROD2)-(WV-
 WD2)/WV-1.)*

```

& DD2**2*NV2*RJV2+(WV*ROV*(WV-
WD3)/(WD3**2*ROD3)-WV*ROV/
& (WD3*ROD3)+1.)*DD3**2*NV3*RJV3)-
WV*ROV*PRFSM+TW*PI*DSM/WV)
C(2)=-6.*RJV2*G2/WD2/ROD2/DD2
C(3)=-2.*RJV2/ROD2/WD2
C(4)=-C(1)/ROD2/WD2+6.*DSTA2/PI/(DD2**3)/ROD2/WD2
C(5)=6.*RJV3*G3/WD3/ROD3/DD3
C(6)=2.*RJV3/ROD3/WD3
C(7)=-C(1)/ROD3/WD3+6.*DSTA3/PI/(DD3**3)/ROD3/WD3
& +(WV-WD3)*C(5)/G3
C(8)=(-FSM*C(1)-TW*PI*DSM-G2*C(4)-G3*C(7)+(WV-
WD2)*C(2)
& +(WV-WD3)*C(5))/G1
C(9)=((IVTV+WV**2/2.-YITD3-WD3**2/2.)*JVC-
& (IVTD3-YITD3)*JVI3+ALFA3*(TV-TD3))*
& 6./WD3/ROD3/DD3
C(10)=C(9)/CP3-WD3*C(7)/CP3
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PV=B(1)
G2=B(2)
DD2=B(3)
WD2=B(4)
G3=B(5)
DD3=B(6)
WD3=B(7)
WV=B(8)
IDST3=B(9)
110 TD3=B(10)
IF(K.EQ.KK) THEN
J=J+1
WRITE(8,200)X,PV,G1,G2,G3,WV,WD2,WD3,DD2,DD3,TD2,TD3,GSM,
& DSM,FISM,ROSM,ROSGR
K=0
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X PV G1 G2 G3 WV WD
&2 WD3 DD2 DD3 TD2 TD3 GSM DSM FISM
& ROSM ROSGR'
J=0
END IF
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120

```

```

200  FORMAT(F6.3,F10.0,3F8.3,3F8.2,2E10.2,2F6.0,F8.3,F6.3,E10.3,
      &2F8.3)
      STOP
      END
      SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DIMENSION F(10),G(40),B(10),C(10)
      IS=IS+1
      GOTO(10,30,60,80),IS
10    E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20    B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30    DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40    B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50    A=E+DX/2.
      GOTO 100
60    DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70    B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80    DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90    B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100  RETURN
      END

```

Файл исходных данных CJ4.DAT

```

10 0.1E-3 0.1 0.14 0.4E5 9.75E-2 0.238 278. 193.5 10.8 426.
349. 283. 8.E-5 8.E-5 8314. 18. 3.1416 10 35. 6.E-3

```

```

N DX Z GCR PV0 XV0 G30 WV0 WD20 WD30 TW0
TD20 TD30 DD20 DD30 UGC AMV PI KK B3 DSMM

```

PROGRAM CNJT2

C Расчет камеры смешения, структура потока

C парокapельная (к двухфазному пароводяному потоку
 C подмешивается холодная вода), задача обратная.
 C Вдоль камеры стат. давление измен. по закону
 C $PV=(1.+X**0.5)*PV0$, то есть $dp/dx>0$.
 DIMENSION B(10),C(10)
 REAL ISM0,ILTL0,IVTD3,IVTV,IDST3,IDST30,
 & LAMV,LAM,IV,JVC,JVI2,JVI3
 RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
 YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
 SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
 IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
 CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
 VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
 SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
 PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
 LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
 OPEN (2,FILE='CJ2.DAT')
 OPEN (8,FILE='REZCJ2.DAT')
 READ(2,*) N,DX,Z,GCR,PV0,XV0,G30,WV0,WD20,WD30,
 & TW0,TD20,TD30,DD20,DD30,UGC,AMV,PI,KK,B3
 N=9
 G10=GCR*XV0
 G20=GCR*(1.-XV0)
 GSM0=G10+G20+G30
 ROV0=1.213E-5*PV0**0.9375
 ROD20=RO(TD20)
 ROD30=RO(TD30)
 FSM0=G10/ROV0/WV0+G20/ROD20/WD20+G30/ROD30/WD30
 DSM0=(4.*FSM0/PI)**0.5
 WSM0=((G10*WV0**2+G20*WD20**2+G30*WD30**2)/GSM0)**0.5
 5
 YILTW0=YILTL(TW0)
 YITD30=YILTL(TD30)
 TV0=5.677*PV0**0.25+273.
 ISM0=(IV(TV0)+WV0**2/2.)*G10+(YILTL(TD20)+WD20**2/2.)*
 & G20+(YITD30+WD30**2/2.)*G30
 IDST30=YITD30+WD30**2/2.
 IDST3=IDST30
 DSM=DSM0
 FSM=FSM0
 G2=G20

```

G3=G30
WV=WV0
WD2=WD20
WD3=WD30
DD2=DD20
DD3=DD30
TD2=TD20
TD3=TD30
GSM=GSM0
IS=0
B(1)=G2
B(2)=DD2
B(3)=WD2
B(4)=G3
B(5)=DD3
B(6)=WD3
B(7)=WV
B(8)=IDST3
B(9)=TD3
J=0
K=0
WRITE(8,*)' X   PV   G1   G2   G3   WV   WD
&2   WD3   DD2   DD3   TD2  TD3   GSM  DSM  FISM
& ROSM ROSGR'
X=0
120 X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
PV=PV0*(1.+X**0.5)
TV=5.677*PV**0.25+273.
ROV=1.213E-5*PV**0.9375
ROD2=RO(TD2)
ROD3=RO(TD3)
G1=GSM0-G2-G3
FSM=G1/ROV/WV+G2/ROD2/WD2+G3/ROD3/WD3
DSM=(4.*FSM/PI)**0.5
WSM=((G1*WV**2+G2*WD2**2+G3*WD3**2)/GSM0)**0.5
FISM=WSM/WSM0
IVTV=IV(TV)
IVTD3=IV(TD3)
CP2=CPL(TD2)
CP3=CPL(TD3)

```

$YITD3=YILTL(TD3)$
 $TD2=((ISM0-(IVTV+WV**2/2.)*G1-(YITD3$
 $\& +WD3**2/2.)*G3)/G2-WD2**2/2.)/CP2+273.$
 $VISV=VIS(TV)$
 $RED2=ABS(WV-WD2)*DD2*ROV/VISV$
 $IF(RED2.GT.0.AND.RED2.LE.1.) CX2=24./RED2$
 $IF(RED2.GT.1.AND.RED2.LE.390.) CX2=24./(RED2**0.667)$
 $IF(RED2.GT.390.) CX2=0.45$
 $DSTA2=CX2*PI*DD2**2*ROV*(WV-WD2)*ABS(WV-WD2)/8.$
 $RED3=ABS(WV-WD3)*DD3*ROV/VISV$
 $IF(RED3.GT.0.AND.RED3.LE.1.) CX3=24./RED3$
 $IF(RED3.GT.1.AND.RED3.LE.390.) CX3=24./(RED3**0.667)$
 $IF(RED3.GT.390.) CX3=0.45$
 $DSTA3=CX3*PI*DD3**2*ROV*(WV-WD3)*ABS(WV-WD3)/8.$
 $REV=WV*DSM*ROV/VISV$
 $CF=0.079/(REV**0.25)$
 $TW=CF*ROV*WV**2/2.$
 $PRV=PR(TV)$
 $LAMV=LAM(TV)$
 $ALFA3=(2.+0.6*RED3**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD3$
 $PVTD2=((TD2-273.)/5.677)**4$
 $PVTD3=((TD3-273.)/5.677)**4$
 $CAPI2=B3/(PVTD2**0.56)$
 $CAPI3=B3/(PVTD3**0.56)$
 $CAPC=B3/(PV**0.56)$
 $GCV=UGC/AMV$
 $JVI2=PVTD2*CAPI2/(1.-0.4*CAPI2)/(2.*GCV*PI*TD2)**0.5$
 $JVI3=PVTD3*CAPI3/(1.-0.4*CAPI3)/(2.*GCV*PI*TD3)**0.5$
 $JVC=PV*CAPC/(1.-0.4*CAPC)/(2.*GCV*PI*TV)**0.5$
 $RJV2=JVC-JVI2$
 $RJV3=JVC-JVI3$
 $ROSM=ROV+G3*(1.-ROV/ROD3)/FSM/WD3+G2*(1.-$
 $ROV/ROD2)/FSM/WD2$
 $ROSGR=(1.-PI*2.**0.5/6.)*(ROD2*G2+ROD3*G3)/(G2+G3)$
 $PPV=PV0/(2.*X**0.5)$
 $C(1)=6.*RJV2*G2/WD2/ROD2/DD2$
 $C(2)=2.*RJV2/ROD2/WD2$
 $C(3)=-PPV/ROD2/WD2+6.*DSTA2/PI/(DD2**3)/ROD2/WD2$
 $C(4)=6.*RJV3*G3/WD3/ROD3/DD3$
 $C(5)=2.*RJV3/ROD3/WD3$
 $C(6)=-PPV/ROD3/WD3+6.*DSTA3/PI/(DD3**3)/ROD3/WD3$
 $\& +(WV-WD3)*C(4)/G3$


```

      C(7)=(-FSM*PPV-TW*PI*DSM-G2*C(3)-G3*C(6)+(WV-
WD2)*C(1)
      & +(WV-WD3)*C(4))/G1
      C(8)=((IVTV+WV**2/2.-YITD3-WD3**2/2.)*JVC-
& (IVTD3-YITD3)*JVI3+ALFA3*(TV-TD3))*
& 6./WD3/ROD3/DD3
      C(9)=C(8)/CP3-WD3*C(6)/CP3
      CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
      G2=B(1)
      DD2=B(2)
      WD2=B(3)
      G3=B(4)
      DD3=B(5)
      WD3=B(6)
      WV=B(7)
      IDST3=B(8)
110   TD3=B(9)
      IF(K.EQ.KK) THEN
      J=J+1
WRITE(8,200)X,PV,G1,G2,G3,WV,WD2,WD3,DD2,DD3,TD2,TD3,GS
M,
      & DSM,FISM,ROSM,ROSGR
      K=0
      IF(J.EQ.10) THEN
      WRITE(8,*)' X   PV   G1   G2   G3   WV   WD
&2   WD3   DD2   DD3   TD2  TD3   GSM  DSM  FISM
&   ROSM  ROSGR'
      J=0
      END IF
      END IF
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
200   FORMAT(F6.3,F10.0,3F8.3,3F8.2,2E10.2,2F6.0,F8.3,F6.3,E10.3,
&2F8.3)
      STOP
      END
Файл исходных данных CJ2.DAT
9 0.1E-3 0.064 0.37 1.E5 9.75E-2 0.2 165. 132. 30. 423.
378. 283. 1.5E-5 4.E-5 8314. 18. 3.1416 10 35.

N DX Z GCR PV0 XV0 G30 WV0 WD20 WD30 TW0
TD20 TD30 DD20 DD30 UGC AMV PI KK B3

```

CONJT2

Идентификаторы программы

FISM- коэффициент скорости камеры смещения

PROGRAM CONJT2

```

C   Расчет камеры смещения, структура потока
C   паракапельная (к двухфазному пароводяному потоку
C   подмешивается холодная вода), задача обратная.
C   Возможно два случая- $dp/dx < 0$  и  $dp/dx = 0$ 
DIMENSION B(10),C(10)
REAL ISM0,ILTL0,IVTD3,IVTV,IDST3,IDST30,
& LAMV,LAM,IV,JVC,JVI2,JVI3
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
OPEN (2,FILE='CJ2.DAT')
OPEN (8,FILE='REZCJ2.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,GCR,PV0,XV0,G30,WV0,WD20,WD30,
& TW0,TD20,TD30,PSR,DD20,DD30,UGC,AMV,PI,KK,B3
N=9
G10=GCR*XV0
G20=GCR*(1.-XV0)
GSM0=G10+G20+G30
ROV0=1.213E-5*PV0**0.9375
ROD20=RO(TD20)
ROD30=RO(TD30)
FSM0=G10/ROV0/WV0+G20/ROD20/WD20+G30/ROD30/WD30
DSM0=(4.*FSM0/PI)**0.5
WSM0=((G10*WV0**2+G20*WD20**2+G30*WD30**2)/GSM0)**0.5
5
YILTW0=YILTL(TW0)
YITD30=YILTL(TD30)
TV0=5.677*PV0**0.25+273.
SM0=(IV(TV0)+WV0**2/2.)*G10+(YILTL(TD20)+WD20**2/2.)*
& G20+(YITD30+WD30**2/2.)*G30
IDST30=YITD30+WD30**2/2.

```

```

IDST3=IDST30
DSM=DSM0
FSM=FSM0
G2=G20
G3=G30
WV=WV0
WD2=WD20
WD3=WD30
DD2=DD20
DD3=DD30
TD2=TD20
TD3=TD30
GSM=GSM0
IS=0
B(1)=G2
B(2)=DD2
B(3)=WD2
B(4)=G3
B(5)=DD3
B(6)=WD3
B(7)=WV
B(8)=IDST3
B(9)=TD3
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X   PV   G1   G2   G3   WV   WD
&2   WD3   DD2   DD3   TD2  TD3   GSM  DSM  FISM
&  ROSM  ROSGR'
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      PV=PV0/((PV0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
      TV=5.677*PV**0.25+273.
      ROV=1.213E-5*PV**0.9375
      ROD2=RO(TD2)
      ROD3=RO(TD3)
      G1=GSM0-G2-G3
      FSM=G1/ROV/WV+G2/ROD2/WD2+G3/ROD3/WD3
      DSM=(4.*FSM/PI)**0.5
      WSM=((G1*WV**2+G2*WD2**2+G3*WD3**2)/GSM0)**0.5
      FISM=WSM/WSM0

```

IVTV=IV(TV)
 IVTD3=IV(TD3)
 CP2=CPL(TD2)
 CP3=CPL(TD3)
 YITD3=YILTL(TD3)
 TD2=((ISM0-(IVTV+WV**2/2.)*G1-(YITD3
 & +WD3**2/2.)*G3)/G2-WD2**2/2.)/CP2+273.
 VISV=VIS(TV)
 RED2=ABS(WV-WD2)*DD2*ROV/VISV
 IF(RED2.GT.0.AND.RED2.LE.1.) CX2=24./RED2
 IF(RED2.GT.1.AND.RED2.LE.390.) CX2=24./(RED2**0.667)
 IF(RED2.GT.390.) CX2=0.45
 DSTA2=CX2*PI*DD2**2*ROV*(WV-WD2)*ABS(WV-WD2)/8.
 RED3=ABS(WV-WD3)*DD3*ROV/VISV
 IF(RED3.GT.0.AND.RED3.LE.1.) CX3=24./RED3
 IF(RED3.GT.1.AND.RED3.LE.390.) CX3=24./(RED3**0.667)
 IF(RED3.GT.390.) CX3=0.45
 DSTA3=CX3*PI*DD3**2*ROV*(WV-WD3)*ABS(WV-WD3)/8.
 REV=WV*DSM*ROV/VISV
 CF=0.079/(REV**0.25)
 TW=CF*ROV*WV**2/2.
 PRV=PR(TV)
 LAMV=LAM(TV)
 ALFA3=(2.+0.6*RED3**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD3
 PVTD2=((TD2-273.)/5.677)**4
 PVTD3=((TD3-273.)/5.677)**4
 CAPI2=B3/(PVTD2**0.56)
 CAPI3=B3/(PVTD3**0.56)
 CAPC=B3/(PV**0.56)
 GCV=UGC/AMV
 JVI2=PVTD2*CAPI2/(1.-0.4*CAPI2)/(2.*GCV*PI*TD2)**0.5
 JVI3=PVTD3*CAPI3/(1.-0.4*CAPI3)/(2.*GCV*PI*TD3)**0.5
 JVC=PV*CAPC/(1.-0.4*CAPC)/(2.*GCV*PI*TV)**0.5
 RJV2=JVC-JVI2
 RJV3=JVC-JVI3
 ROSM=ROV+G3*(1.-ROV/ROD3)/FSM/WD3+G2*(1.-
 ROV/ROD2)/FSM/WD2
 ROSGR=(1.-PI*2.**0.5/6.)*(ROD2*G2+ROD3*G3)/(G2+G3)
 PPV=-2.*PV0*(PV0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PV0/PSR-1.)
 & *(X/Z)**2+1.))**2)
 C(1)=6.*RJV2*G2/WD2/ROD2/DD2
 C(2)=2.*RJV2/ROD2/WD2

```

C(3)=-PPV/ROD2/WD2+6.*DSTA2/PI/(DD2**3)/ROD2/WD2
C(4)=6.*RJV3*G3/WD3/ROD3/DD3
C(5)=2.*RJV3/ROD3/WD3
C(6)=-PPV/ROD3/WD3+6.*DSTA3/PI/(DD3**3)/ROD3/WD3
& +(WV-WD3)*C(4)/G3
C(7)=(-FSM*PPV-TW*PI*DSM-G2*C(3)-G3*C(6)+(WV-
WD2)*C(1)
& +(WV-WD3)*C(4))/G1
C(8)=((IVTV+WV**2/2.-YITD3-WD3**2/2.)*JVC-
& (IVTD3-YITD3)*JVI3+ALFA3*(TV-TD3))*
& 6./WD3/ROD3/DD3
C(9)=C(8)/CP3-WD3*C(6)/CP3
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
G2=B(1)
DD2=B(2)
WD2=B(3)
G3=B(4)
DD3=B(5)
WD3=B(6)
WV=B(7)
IDST3=B(8)
110 TD3=B(9)
IF(K.EQ.KK) THEN
J=J+1
WRITE(8,200)X,PV,G1,G2,G3,WV,WD2,WD3,DD2,DD3,TD2,TD3,GSM,
& DSM,FISM,ROSM,ROSGR
K=0
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X PV G1 G2 G3 WV WD
&2 WD3 DD2 DD3 TD2 TD3 GSM DSM FISM
& ROSM ROSGR'
J=0
END IF
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
200 FORMAT(F6.3,F10.0,3F8.3,3F8.2,2E10.2,2F6.0,F8.3,F6.3,E10.3,
&2F8.3)
END
Файл исходных данных CJ2.DAT
9 0.1E-3 0.1 0.37 1.E5 9.75E-2 0.2 165. 132. 30. 423.
378. 283. 1.E5 1.5E-5 2.E-5 8314. 18. 3.1416 10 35.
N DX Z GCR PV0 XV0 G30 WV0 WD20 WD30 TW0

```

TD20 TD30 PSR DD20 DD30 UGC AMV PI KK B3

PROGRAM PIPE_TF

C Расчет цилиндрического канала,

C работающего на воздухе с испаряющимися каплями.

REAL

LAM,LAMG,JV,IVTK,IVTGV,IV,MGV,KGV,NDR,MASS,IL,
& IGST0,IVST0,IKST0,IST0,NV

SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.))-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3

RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.))-2.695E-3*(A-273.)**2

CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.))+0.59823E-2*(A-273.)**2

DIMENSION B(10),C(10)

OPEN (2,FILE='PIPE.DAT')

OPEN (4,FILE='CON')

OPEN (6,FILE='REZPIPE.DAT')

READ(2,*) N,DX,Z,P0,WGV0,WK0,PI

READ(2,*) TGV0,TK0,GG0,GV0,GK0

READ(2,*) DK0,UGC,AMG,AMV

READ(2,*) KK,PSD

GGV0=GG0+GV0

GSM0=GGV0+GK0

RGV0=UGC*(GG0/AMG+GV0/AMV)/GGV0

ROGV0=P0/TGV0/RGV0

ROK0=RO(TK0)

FGV0=GGV0/ROGV0/WGV0

F0=GGV0/ROGV0/WGV0+GK0/ROK0/WK0

D0=(4.*F0/PI)**0.5

SK=6.*GK0/PI/DK0**3/ROK0

N=7

PGV=P0

GG=GG0

GV=GV0

WGV=WGV0

WK=WK0

TGV=TGV0

TK=TK0

DK=DK0

GK=GK0

PRINT*,' X=',X,' PGV=',PGV,' D0=',D0,' ROK0=',ROK0

IS=0

B(1)=PGV

B(2)=GV

```

B(3)=DK
B(4)=WGV
B(5)=WK
B(6)=TK
B(7)=TGV
K=0
X=0
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      GGV=GG+GV
      AMGV=GGV*AMV*AMG/(GV*AMG+GG*AMV)
      PV=GV*AMGV*PGV/GGV/AMV
      GCGV=UGC*(GG/AMG+GV/AMV)/GGV
      CPG=7.*UGC/AMG/2.
      CPV=8.*UGC/AMV/2.
      CPGV=(CPG*GG+CPV*GV)/GGV
      CPK=CPL(TK)
      NV=SK/WK/F0
      PVS=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*TK-7821.541/TK-
& 11.48776*ALOG(TK))
      DW=WGV-WK
      VISG=17.2E-6+0.05E-6*(TGV-273.)-0.03E-9*(TGV-273.)**2
      LAMG=23.8E-3+8.4189E-5*(TGV-273.)-4.2908E-8*(TGV-
273.)**2
      ROGV=PGV/TGV/GCGV
      PRINT*, ' X=',X, ' PVS=',PVS, ' D0=',D0, ' ROGV=',ROGV
      DIFV=22.E-6*(TGV/273.)**PSD*1.013E5/PGV
      SC=VISG/ROGV/DIFV
      REK=ABS(DW)*DK*ROGV/VISG
      BETA=(2.+0.6*REK**0.5*SC**0.33)*DIFV/DK
      JV=BETA*AMV*(PVS-PV)/UGC/TGV
      ROK=999.9-0.1475*(TK-273.)-2.695E-3*(TK-273.)**2
      CX=24./REK+4.4/(REK**0.5)+0.32
      DSTAR=CX*PI*DK**2*ROGV*ABS(DW)*DW/8.
      FGV=GGV/ROGV/WGV
      FSM=F0
      DSM=D0
      PR=VISG*CPGV/LAMG
      ALFA=(2.+0.6*REK**0.5*PR**0.33)*LAMG/DK
      DT=TGV-TK
      SK=WK/WGV

```

REGV=WGV*DSM*ROGV/VISG
 CF=0.079/(REGV**0.25)
 TW=CF*ROGV*WGV**2/2.
 GK=GK0-GV
 FK=GK/ROK/WK
 F0D=GGV/ROGV/WGV+GK/ROK/WK
 D0D=(4.*F0D/PI)**0.5
 DLD0=D0D-D0
 CVGV=CPGV-GCGV
 KGV=CPGV/CVG
 SAGV=(KGV*GCGV*TGV)**0.5
 MGV=WGV/SAGV
 DGK=GK0-GK
 DGKOT=DGK*100./GK0
 DLTGV=TGV0-TGV
 DLDK=DK0-DK
 DLDKOT=DLDK*100./DK0
 TW=CF*ROGV*WGV**2/2.
 IVTK=(2501.+2.04*(TK-273.)-29.E-4*(TK-273.)**2)*1.E3
 IVTGV=(2501.+2.04*(TGV-273.)-29.E-4*(TGV-273.)**2)*1.E3
 C(1)=(DSTAR*(WK*ROK*FGV*NV*FSM/WGV/GGV-
 6.*FK/WK/PI/DK**3)
 &
 +WK*ROK*FGV*TW*PI*DSM/WGV/GGV+(WK*ROK/WGV/ROGV
 -
 & WK*FK*ROGV*(WK-WGV)/WGV/GGV-
 1.)*JV*PI*DK**2*NV*FSM)
 & *WGV**2*ROGV/FGV/ROK/WK/(MGV**2-
 (GK/GGV)*(WGV/WK)**3*(ROGV
 & /ROK)**2-1.)
 C(2)=6.*JV*GK/WK/ROK/DK
 C(3)=-2.*JV/ROK/WK
 C(4)=-
 (GGV*C(1)/WGV/ROGV+6.*DSTAR*GK/PI/(DK**3)/ROK/WK+
 & TW*PI*DSM+DW*C(2))/GGV
 C(5)=-C(1)/WK/ROK+6.*DSTAR/PI/(DK**3)/ROK/WK
 C(6)=(+ALFA*DT-SQV(TK)*JV)*6./WK/ROK/DK/
 & CPK-WK*C(5)/CPK
 C(7)=-((IVTGV-CPK*(TK-273.)+WGV**2/2.-WK**2/2.)*C(2)
 & +GK*(CPK*C(6)+WK*C(5)))/CPGV/GGV-WGV*C(4)/CPGV
 CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
 PGV=B(1)


```

GV=B(2)
DK=B(3)
WGV=B(4)
WK=B(5)
TK=B(6)
110  TGV=B(7)
      WRITE(4,*) ' X=',X,' PGV=',PGV,' WGV=',WGV,' WK=',WK
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) ' X=',X,' PGV=',PGV,' WGV=',WGV,'
WK=',WK
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) 'SK=',SK,' TGV=',TGV,' TK=',TK
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) 'ROGV=',ROGV,' DSM=',DSM,'
DK=',DK
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) 'DGK=',DGK,' DGKOT=',DGKOT,'
DLTGV=',DLTGV
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) 'DLDK=',DLDK,'
DLDKOT=',DLDKOT,' DT=',DT
      IF(K.EQ.KK)WRITE(6,*) 'MGV=',MGV,' DLD0=',DLD0
      IF(K.EQ.KK)K=0
      IF(X.LT.Z)GOTO 120
      STOP
      END
      SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
      IS=IS+1
      GOTO(10,30,60,80),IS
10    E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20    B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30    DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40    B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50    A=E+DX/2.
      GOTO 100
60    DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70    B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80    DO 90 I=1,N

```

```

G(4*I)=C(I)*DX
B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90  B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
    IS=0
100 RETURN
    END
    Файл исходных данных PIPE.DAT
    7 0.3E-3 3. 6.E5 150. 130. 3.1416
    873. 373. 0.2 0.01 0.2
    20.E-5 8314. 29. 18.
    10 2.
    N DX  Z  P0  WGV  WK  PI
    TGV  TK0  GG  GV  GK
    DK0  UGC  AMG  AMV
    KK  PSD

```

Приложение №4

Идентификаторы программ LAV21D и LAV27A

GVB, WB, DB- расход, скорость и диаметр пузырьков

TLS- температура насыщения

DBCR- критический диаметр пузырька

DTPL - перегрев жидкости относительно температуры насыщения при данном давлении

ROVB- плотность пара в пузырьке

ROVTS- плотность пара при температуре насыщения

PSI- коэффициент в формуле (5.13)

PSIA- коэффициент в формуле (5.16)

WBCR- работа образования пузырька критического размера

BN- число Больцмана

GIBSN- число Гиббса

IGB- интенсивность образования пузырьков критического размера

NBS- поток пузырьков

VB- объем пузырька

TDSR- температура капель, полученная из уравнения энергии

BIO- число Био

FURC- число Фурье

SQ- удельная теплота парообразования

LAV21D

```

PROGRAM LAV21D
  REAL IVTS,ILTL0,IVTV,IGB,NBS,
  & LAMLS,LAMDD,MU(3),B(10),C(10)
  TET(A)=2.*(SIN(A)-A*COS(A))*SIN(A)*EXP(-A**2*FURC)/(A-
  SIN(A)*
  & COS(A))/A
  RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
  YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
  SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
  IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
  CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
  VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
  SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
  OPEN (2,FILE='L21D.DAT')
  OPEN (8,FILE='REZL21D.DAT')
  READ(2,*) N,DX,Z,GCR,TL0,PL0,DBCR,DTPLCR,
  & BN,DC0,UGC,AMV,PI,A1,PSIA,B1,LAMLS,KK,DD0,
  & AA,B3,PSR,DMU0,EPS,LAMDD,A2
  N=3
  NP=0
  ROL0=RO(TL0)
  ILTL0=YILTL(TL0)*GCR
  FC0=PI*DC0**2/4.
  WL0=GCR/ROL0/FC0
  FC=FC0
  PL=PL0
  TL=TL0
  DB=DBCR
  RBCR=DBCR/2.
  TLS=5.677*PL**.25+273.
  SIGL=SIG(TL)
  ROVB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMV/UGC/TLS
  GVB=0.
  WL=WL0
  WB=WL0
  IS=0
  B(1)=DB
  B(2)=WB
  B(3)=WL
  J=0
  K=0

```

```

X=0
WRITE(8,*)' X PL WL WB TLS ROSM DTPL DC'
120  X=X+DX
     K=K+1
     DO 110 LL=1,4
     PL=PL0/((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
     print*,'X,Z,PL ',X,Z,PL
     TLS=5.677*PL**.25+273.
     IVTS=IV(TLS)
     CPLIT=CPL(TL)
     GL=GCR-GVB
     IF(DTPL.GE.DTPLCR.OR.NP.EQ.1)
&  TL=((ILTL0-(IVTS+WB**2/2.)*GVB)/GL-
WL**2/2.)/CPLIT+273.
     DTPL=TL-TLS
     ROL=RO(TL)
     ROLS=RO(TLS)
     ROSGR=ROL*(1.-PI*2**.5/6.)*A2
     VISL=VIS(TL)
     SIGL=SIG(TL)
     ROVB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMV/UGC/TLS
     IF(NP.EQ.0)FC=GCR/WL/ROL
     IF(DTPL.GE.DTPLCR)FC=GVB/WB/ROVB+GL/WL/ROL

IF(DTPL.LE.DTPLCR.AND.NP.EQ.1)FC=GVB/WB/ROVB+GL/WL/R
OL
     DC=(4.*FC/PI)**.5
     IVTS=IV(TLS)
     SIGLS=SIG(TLS)
     SQ=SQV(TLS)
     ROVTS=1.213E-5*((TLS-273.)/5.677)**3.75
     IF(DTPL.LT.DTPLCR.OR.NP.EQ.1)GOTO 130
     PSI=RBCR*DTPLCR*ROVTS*SQ/2./SIGLS/TLS
WBCR=16.*PI*(SIGLS**3)*(PSI*TLS/DTPLCR/ROVTS/SQ)**2/3.
     GIBSN=WBCR/TLS/BN
     IGB=EXP(A1-PSIA*GIBSN)
     NBS=IGB*FC*DX
     GVB=NBS*PI*DB**3*ROVB/6.
     NP=1
130  CPLIT=CPL(TL)
     GVB=NBS*PI*DB**3*ROVB/6.
     IF(NP.EQ.0)ROSM=ROL

```

```

      IF(NP.EQ.1)ROSM=ROVB*ROL/(ROVB+GVB*(ROL-
ROVB)/GCR)
      DC=(4.*FC/PI)**0.5
      XV=GVB/GCR
      REN=WL*DC*ROSM/VISL
      CF=.0791/(REN**.25)
      TW=CF*ROSM*WL**2/2.
      PPL=-2.*PL0*(PL0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2
& +1.))**2)
      PB=PL+4.*SIGLS/DB
      CAP=B3/(PB**.56)
      REB=ABS(WL-WB)*DB*ROL/VISL
      IF(REB.GT.0.AND.REB.LE.1.)CX=24./REB
      IF(REB.GT.1.AND.REB.LE.390.)CX=24./(REB**.667)
      IF(REB.GT.390.)CX=.45
      VB=PI*DB**3/6.
      C(1)=8.*LAMLS*CPLIT*ROLS*ABS(TL-TLS)*(TL-
TLS)*B1*NP/
      & (SQ**2*ROVTS**2*DB*WB)
      IF(NP.EQ.0)C(2)=-FC*PPL/GCR-TW*PI*DC/GCR
      IF(NP.EQ.1)C(2)=(-PPL/WB+.75*CX*ROL*WB*(WL/WB-1.))**2/
& DB+(WL-
WB)*(1.+5*ROL*WL*NBS*VB/WB/GL)*3.*ROVB*C(1)/DB
& -.5*ROL*WL*(FC*PPL+TW*PI*DC)/WB/GL)/
& (ROVB+.5*ROL*(1.+WL*GVB/WB/GL))
      IF(NP.EQ.0)C(3)=-FC*PPL/GCR-TW*PI*DC/GCR
      IF(NP.EQ.1)C(3)=(-GVB*C(2)+(WL-
WB)*NBS*VB*3.*ROVB*C(1)/
& DB-FC*PPL-TW*PI*DC)/GL
      CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
      DB=B(1)
      WB=B(2)
110    WL=B(3)
      IF(K.EQ.KK)THEN
      J=J+1
      IF(DTPL.LT.DTPLCR) THEN
      WRITE(8,200)X,PL,WL,WB,TLS,ROSM,DTPL,DC
      IF(J.EQ.10) THEN
      WRITE(8,*)' X PL WL WB TLS ROSM DTPL DC'
      ENDDIF
      ELSE

```

```

WRITE(8,210)X,PL,WL,WB,TLS,ROSM,DTPL,DC,ROVB,GVB,XV,N
BS,DB
  & ,ROSGR,ROSM
  IF(J.EQ.10) THEN
    WRITE(8,*)' X PL WL WB TLS ROSM DTPL DC ROVB GVB
XV NBS DB
  &ROSM'
    ENDIF
  PRINT *,' X=',X,' ROSM=',ROSM,' ROSGR=',ROSGR
    END IF
  K=0
  J=0
    END IF
  IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 120
  N=4
  PV=PL
  GV=GVB
  DD=DD0
  WV=WB+AA
  WD=WL-AA
  TDSR=TL
  GD=GL
  TV=TLS
  ROD=ROL
  ROV=ROVB
  B(1)=GV
  B(2)=DD
  B(3)=WV
  B(4)=WD
  PV=PL0/((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
  PPV=-2.*PL0*(PL0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PL0/PSR-1.)
*(X/Z)**2+1.))
  TV=5.677*PV**.25+273.
  ROV=1.2113E-5*PV**.9375
  ROD=RO(TDSR)
  FC=GV/ROV/WV+GD/ROD/WD
  DC=(4.*FC/PI)**.5
  RD=DD/2.
  WRITE(8,*)' X PV DD WV WD FC DC XV FIN TV TDSR DTDV
ALFAM'
140  X=X+DX
      K=K+1

```

```

DO 150 LL=1,4
GD=GCR-GV
RD=DD/2.
ROD=999.9-0.1475*(TDSR-273.)-2.695E-3*(TDSR-273.)**2
PV=PL0/((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
PPV=-2.*PL0*(PL0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2
& +1.)**2)
ROV=1.21E-5*PV**.9375
TV=5.677*PV**.25+273.
SQ=(2447.7-1.283*(TV-273.)-6.26E-3*(TV-273.)**2)*1.E3
ILTL0=YILTL(TL0)*GCR
IVTV=(2461.1+2.636*(TV-273.)-4.88E-3*(TV-273.)**2)*1.E3
CPDIT=4275.5-1.2209*(TDSR-273.)+.59823E-2*(TDSR-273.)**2
TDSR=((ILTL0-(IVTV+WV**2/2.)*GV)/GD-WD**2/2.)
/CPDIT+273.
VISV=(8.35+3.42E-2*(TV-273.)+2.E-5*(TV-273.)**2)*1.E-6
RED=ABS(WV-WD)*DD*ROV/VISV
IF(RED.GT.0..AND.REB.LE.1.)CX=24./RED
IF(RED.GT.1..AND.RED.LE.390.)CX=24./(RED**.667)
IF(RED.GT.390.)CX=.45
DSTAR=CX*PI*DD**2*ROV*(WV-WD)**2/8.
FC=GV/ROV/WV+GD/ROD/WD
DC=(4.*FC/PI)**.5
WVD=((GV*WV**2+GD*WD**2)/(GV+GD))**.5
SWVD=(2.*CPDIT*(TL0-TV-TV*ALOG(TL0/TV))**.5
FIN=WVD/SWVD
XV=GV/(GV+GD)
REV=WV*DC*ROV/VISV
CF=.079/REV**.25
TW=CF*ROV*WV**2/2.
CAP=B3/PV**.56
GCV=UGC/AMV
AD=LAMDD/CPDIT/ROD
ALFAM=SQ**2*CAP*ROV/TV/(2.*PI*GCV*TV)**.5
BIO=ALFAM*RD/LAMDD
TAUF=DX/WD
FURC=AD*TAUF/RD**2
MU(1)=2.
MU(2)=5.
MU(3)=8.
DO 20 I=1,3
DMU=DMU0

```

```

25  MU(I)=MU(I)+DMU
    Y1=MU(I)/(BIO-1.)
    Y2=-SIN(MU(I))/COS(MU(I))
    IF(ABS(Y1-Y2).LT.EPS) GOTO 20
    IF(ABS(Y1)-ABS(Y2)) 9,9,10
9   GOTO 25
10  MU(I)=MU(I)-DMU
    DMU=DMU/2.
    GOTO 25
20  CONTINUE
    TETA1=TET(MU(1))
    TETA2=TET(MU(2))
    TETA3=TET(MU(3))
    TETA=TETA1+TETA2+TETA3
    DTDV=(TDSR-TV)*TETA
    DJDV=ALFAM*DTDV/SQ
    C(1)=6.*DJDV*GD/WD/ROD/DD
    C(2)=-2.*DJDV/ROD/WD
    C(3)=-((PPV*GV/WV/ROV+6.*DSTAR*GD/WD/PI/DD**3/ROD
& -(WV-WD)*C(1))/GV
    C(4)=-PPV/ROD/WD+6.*DSTAR/PI/DD**3/ROD/WD
150 CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
    GV=B(1)
    DD=B(2)
    WV=B(3)
    WD=B(4)
    IF(K.EQ.KK) THEN
        J=J+1
        WRITE(8,220)
X,PV,DD,WV,WD,FC,DC,XV,FIN,TV,TDSR,DTDV,ALFAM
    IF(J.EQ.10) THEN
        WRITE(8,*)' X PV DD WV WD FC DC XV FIN TV TDSR DTDV
ALFAM'
        J=0
        PRINT *, ' X=',X,' WV=',WV
            ENDIF
        K=0
            ENDIF
        IF(X.LT.Z) GOTO 140
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,F6.0,F8.3,F6.1,F6.3)
210  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.3,F6.0,F8.3,F6.1,F6.3,2F8.3,F6.3,F11.0,

```



```

& E10.3,2F8.3)
220  FORMAT(F6.3,F10.0,E10.3,2F8.3,E10.2,3F6.3,2F6.0,F11.0)
      WRITE(8,220)
X,PV,DD,WV,WD,FC,DC,XV,FIN,TV,TDSR,ALFAM
      STOP
      END
Файл исходных данных L21D.DAT
3 0.1E-3 0.2 0.3 428. 6.E5 2.E-8 3.
1.38E-23 3.E-2 8314. 18. 3.1416 91. 15.3E-3 0.185
0.68 10 1.5E-5 0.0 70. 1.E5 1.E-1 2.E-3 0.68 1.0

N DX Z GKR TL0 PL0 DBCR DTPLCR
BN DC0 UGC AMV PI A1 PSIA B1
LAMLS KK DD0 AA B3 PSR DMU0 EPS LAMDD A2

```

LAV27A

PROGRAM LAV27A

```

C  Расчет сопла Лавала с парогенерирующей решеткой
C  на входе (прямая задача).
DIMENSION B(10),C(10)
REAL JVI,JVC,LAMV
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
YIV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
OPEN (2,FILE='L27.DAT')
OPEN (8,FILE='REZL27A.DAT')
READ(2,*) N,DX,GCR,GV1,TL0,PL0,TD1,PV1,
& DC1,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,UGC,AMV,PI,
& KK,DD1,B3,WV1
Z=ZCC+ZCM+ZCD
FC1=PI*DC1**2/4.
TD=TD1

```

```

PV=PV1
WV=WV1
GV=GV1
FC=FC1
DD=DD1
ROD=RO(TD)
TV=5.677*PV**0.25+273.
ROV=1.213E-5*PV**0.9375
FV=GV/ROV/WV
FD=FC-FV
GD=GCR-GV
WD=GD/ROD/FD
CPD=CPL(TD)
N=6
IS=0
B(1)=PV
B(2)=GV
B(3)=DD
B(4)=WV
B(5)=WD
B(6)=TD
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X   PV   GV   GD   DD   WV   WD
&  TV  TD  FC   DC  FIN'
140  X=X+DX
     K=K+1
     IF(X.GT.Z)GOTO 16
     DO 150 LL=1,4
     GD=GCR-GV
     ROD=RO(TD)
     ROV=1.213E-5*PV**.9375
     TV=5.677*PV**.25+273.
     SQ=SQV(TV)
     VISV=(8.35+3.42E-2*(TV-273.)+2E-5*(TV-273.）**2)*1E-6
     IF(X.LT.ZCC)DC=DC1-(DC1-DCM)*X/ZCC
     IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM))DC=DCM
     IF(X.GT.(ZCC+ZCM))DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
     FC=PI*DC**2/4.

```

$$\text{IF}(X.LT.ZCC)\text{PRFC}=-\text{PI}*(\text{DC1}-(\text{DC1}-\text{DCM})*X/ZCC)*(\text{DC1}-\text{DCM})/2./ZCC$$

$$\text{IF}(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM))\text{PRFC}=0.$$

$$\text{IF}(X.GT.(ZCC+ZCM))\text{PRFC}=\text{PI}*(\text{DCM}+(\text{DCSR}-\text{DCM})*(X-(ZCC+ZCM) \&)/ZCD)*(\text{DCSR}-\text{DCM})/(2.*ZCD)$$

$$\text{RED}=\text{ABS}(\text{WV}-\text{WD})*\text{DD}*\text{ROV}/\text{VISV}$$

$$\text{IF}(\text{RED}.GT.0.AND.\text{RED}.LE.1.)\text{CX}=24./\text{RED}$$

$$\text{IF}(\text{RED}.GT.1.AND.\text{RED}.LE.390.)\text{CX}=24./\text{RED}**.667$$

$$\text{IF}(\text{RED}.GT.390.)\text{CX}=.45$$

$$\text{DSTAR}=\text{CX}*\text{PI}*\text{DD}**2*\text{ROV}*\text{ABS}(\text{WV}-\text{WD})*(\text{WV}-\text{WD})/8.$$

$$\text{FD}=\text{GD}/\text{ROD}/\text{WD}$$

$$\text{FV}=\text{FC}-\text{FD}$$

$$\text{REV}=\text{WV}*\text{DC}*\text{ROV}/\text{VISV}$$

$$\text{CF}=.079/\text{REV}**.25$$

$$\text{TW}=\text{CF}*\text{ROV}*\text{WV}**2/2.$$

$$\text{PRV}=1.28-4.4\text{E}-3*(\text{TV}-273.)+2.4\text{E}-5*(\text{TV}-273.)**2$$

$$\text{LAMV}=(1.801+2.69\text{E}-3*(\text{TV}-273.)+3.02\text{E}-5*(\text{TV}-273.)**2)*1.\text{E}-2$$

$$\text{PPROV}=8.805129\text{E}4*\text{PV}**62.5\text{E}-3$$

$$\text{ALFA}=(2.+6*\text{RED}**.5*\text{PRV}**.33)*\text{LAMV}/\text{DD}$$

$$\text{GCV}=\text{UGC}/\text{AMV}$$

$$\text{PVT D}=(\text{TD}-273.)/5.667)**4$$

$$\text{CAP}=\text{B3}/(\text{PV}**0.56)$$

$$\text{JVI}=\text{PVT D}*\text{CAP}/(1.-4*\text{CAP})/(2.*\text{GCV}*\text{PI}*\text{TD})**.5$$

$$\text{JVC}=\text{PV}*\text{CAP}/(1.-4*\text{CAP})/(2.*\text{GCV}*\text{PI}*\text{TV})**.5$$

$$\text{RJV}=\text{JVI}-\text{JVC}$$

$$\text{CPD}=\text{CPL}(\text{TD})$$

$$\text{WVD1}=(\text{GV}*\text{WV}**2+\text{GD}*\text{WD}**2)/(\text{GV}+\text{GD})**.5$$

$$\text{SWVD}=91.5*(\text{TL0}-\text{TV})/((\text{TL0}+\text{TV})**0.5)$$

$$\text{FIN}=\text{WVD1}/\text{SWVD}$$

$$\text{C}(1)=(.75*\text{CX}*\text{ROV}*\text{WV}*\text{FD}*\text{ABS}(\text{WV}/\text{WD}-1.)*(\text{WV}/\text{WD}-1.)*$$

$$\& ((\text{WD}/\text{WV})**2-\text{ROV}/\text{ROD})/\text{DD}+$$

$$\& \text{CF}*\text{PI}*\text{DC}*\text{GV}/(2.*\text{FV})+(1.+(1.-\text{WD}/\text{WV})-\text{ROV}*\text{WV}/(\text{ROD}*\text{WD}))$$

$$\& *6.*\text{RJV}*\text{FD}/\text{DD}-\text{WV}*\text{ROV}*\text{PRFC})$$

$$\& *\text{WV}/\text{FV}/(\text{WV}**2/\text{PPROV}-(\text{GD}/\text{GV})*(\text{WV}/\text{WD})**3*(\text{ROV} \& /(\text{ROD})**2-1.)$$

$$\text{C}(2)=6.*\text{RJV}*\text{GD}/\text{WD}/\text{ROD}/\text{DD}$$

$$\text{C}(3)=-2.*\text{RJV}/\text{ROD}/\text{WD}$$

$$\text{C}(4)=-\text{C}(1)*\text{GV}/\text{WV}/\text{ROV}+6.*\text{DSTAR}*\text{GD}/\text{WD}/\text{PI}/(\text{DD}**3)/\text{ROD}$$

$$\& +\text{TW}*\text{PI}*\text{DC}+(\text{WV}-\text{WD})*\text{C}(2))/\text{GV}$$

$$\text{C}(5)=-\text{C}(1)/\text{ROD}/\text{WD}+6.*\text{DSTAR}/\text{PI}/(\text{DD}**3)/\text{ROD}/\text{WD}$$

```

C(6)=-6.*(SQ*RJV+ALFA*(TD-TV))/CPD/ROD/DD/WD
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PV=B(1)
GV=B(2)
DD=B(3)
WV=B(4)
WD=B(5)
150 TD=B(6)
IF(K.EQ.KK)THEN
WRITE(8,200) X,PV,GV,GD,DD,WV,WD,TV,TD,FC,DC,FIN
K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10)THEN
WRITE(8,*)' X   PV   GV   GD   DD   WV   WD
& TV  TD  FC   DC  FIN'
J=0
      END IF
      END IF
IF(X.LT.Z)GOTO 140
OPEN(3,FILE='CNFL1A.DAT')
WRITE(3,*) PV,GV,WV,GD,WD,TD,DD
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F6.3,E10.2,2F8.2,2F6.0,E10.3,2F6.3)
16  STOP
END
  Файл исходных данных L27.DAT
  6 0.1E-3 0.28 0.0024 428. 0.6E6 427. 0.45E6
  3.E-2 8.114E-3 2.E-2 4.E-2 2.E-3 105.E-3 8314. 18. 3.1416
  10 15.E-6 1.038 2.2

N,DX,GCR,GV1,TL0,PL0,TD1,PV1,
DC1,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,UGC,AMV,PI,
KK,DD1,B3,CV1

```

Приложение №5

Идентификаторы программ BUBBLE - BUBBLE4

Z- длина канала

ZCC, ZCM, ZCD - длины сужающейся, цилиндрической и расширяющейся частей канала

GSM- расход смеси

GB- расход воздуха, заключенного в пузырьках

GCA- газовая постоянная воздуха
 PL, TL- давление $p_{ж}$, температура $T_{ж}$
 SB- поток пузырей в единицу времени \dot{n} , 1/с
 GB1- масса одного пузырька, кг
 ROB- плотность воздуха в пузыре
 ROJ- плотность жидкости $\rho_{ж}$
 ROSM- плотность смеси при наличии скольжения между фазами
 WB, WL, WSM- скорости пузырька, жидкости и смеси
 SIGL- коэффициент поверхностного натяжения жидкости
 VISL- коэффициент динамической вязкости жидкости, $\mu_{ж}$
 VB- объемный расход пузырьков, м³/с
 VL- объемный расход жидкости, м³/с
 REB- число Рейнольдса пузырька
 FB, FL- сечения канала, занятые соответственно газовой и жидкой фазами
 RES, FRIC, ARF, GEOM- воздействия на поток, определяемые соответственно силами сопротивления пузырьков, силами трения, силой Архимеда и геометрией канала
 LAML- коэффициент теплопроводности жидкости
 ISM- энтальпия смеси, Вт
 PB- давление в пузырьке
 AL- скорость звука в воде
 ASM- скорость звука в смеси
 XG- отношение $\dot{G}_{п} / \dot{G}$
 ALFA- объемное газосодержание
 ALFALB- коэффициент теплоотдачи на границе пузырек-жидкость
 PPL- производная dp/dz
 PRFC- производная dF_c/dz
 ROSGR- плотность, при которой в процессе расширения поток переходит из пузырьковой в капельно-газовую структуру

PROGRAM BUBBLE

C Программа позволяет выполнить расчет
 C канала с пузырьковой структурой потока.
 C Задача прямая, изотермическая, пузырек
 C воздушный, учитывается сжимаемость воздуха.
 DIMENSION B(10),C(10)
 RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
 SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
 CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
 VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
 OPEN (2,FILE='BUB.DAT')

```

OPEN (8,FILE='REZBUB.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,GB0,GL0,TL0,PL0,DB0,WB0,WL0,
& UGC,AMG,PI,GS,DCM,KK
GSM0=GB0+GL0
GCA=UGC/AMG
ROB0=PL0/TL0/GCA
SB=6.*GB0/(PI*DB0**3*ROB0)
GB10=PI*DB0**3*ROB0/6.
ROL0=RO(TL0)
FC0=GB0/WB0/ROB0+GL0/WL0/ROL0
DC0=(4.*FC0/PI)**.5
N=3
DC=DC0
PL=PL0
TL=TL0
DB=DB0
WB=WB0
WL=WL0
GB=GB0
GL=GL0
FC=FC0
SIGL=SIG(TL)
ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMG/UGC/TL
IS=0
B(1)=PL
B(2)=WB
B(3)=WL
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X    PL    WL    WB TL    ROSM DC
& ROB GB  GL  ALF  DB  ROSGR'
120  X=X+DX
K=K+1
DO 110 LL=1,4
ROL=RO(TL)
ROSGR=ROL*(1.-PI*2.**.5/6.)
VISL=VIS(TL)
SIGL=SIG(TL)
DC=DC0-(DC0-DCM)*X/Z
PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/Z)*(DC0-DCM)/2./Z
FC=PI*DC**2/4.

```

```

ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMG/UGC/TL
DB=(6.*GB10*GCA*TL/(PI*PL))**.333
VB=SB*PI*DB**3/6.
VL=(GSM0-GB0)/ROL
ROSM=GSM0/(VB+VL)
REC=WL*DC*ROSM/VISL
CF=.0791/(REC**.25)
TW=CF*ROSM*WL**2/2.
REB=ABS(WL-WB)*DB*ROL/VISL
IF(REB.GT.0.AND.REB.LE.1.)CX=24./REB
IF(REB.GT.1.AND.REB.LE.390.)CX=24./(REB**.667)
IF(REB.GT.390.)CX=.45
FB=GB/ROB/WB
FL=GL/ROL/WL
ALF=FB/FC
BO=1.+ROL/ROB/2.+ROL*WL*GB/(2.*ROB*WB*GL)
AO=GB/GL-FB*WL/(FL*WB)
CO=BO/AO
OPR=CO*FB*WL/(ROB*GCA*TL*FL)-
& CO*FC/GL +ROL*WL*FC/
& (2.*ROB*WB*GL)+1./ROB/WB
RES=3.*ROL*CX*ABS(WL-WB)*(WL-WB)/(4.*ROB*WB*DB)
FRIC=(CO-ROL*WL/(2.*ROB*WB))*TW*PI*DC/GL
ARF=GS*(ROL-ROB)/ROB/WB
GEOM=CO*WL*PRFC/FL
C(1)=(RES+FRIC+ARF-GEOM)/OPR
C(2)=(-(ROL*WL*FC/(2.*ROB*WB*GL)+1./ROB/WB)*C(1)+
& 3.*ROL*CX*ABS(WL-WB)*(WL-WB)/(4.*ROB*WB*DB)-
& ROL*WL*TW*PI*DC/(2.*ROB*WB*GL)+GS*(ROL-
ROB)/ROB/WB)/BO
C(3)=-((FC*C(1)+TW*PI*DC+GB*C(2))/GL
110 CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PL=B(1)
WB=B(2)
WL=B(3)
IF(K.EQ.KK)THEN
WRITE(8,200)
X,PL,WL,WB,TL,ROSM,DC,ROB,GB,GL,ALF,DB,ROSGR
K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X PL WL WB TL ROSM DC

```

```

& ROB GB GL ALF DB ROSGR'
J=0
    END IF
END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 130
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.2,F6.0,F8.3,F6.3,F8.3,2F6.3,
& F6.3,E10.2,F8.3)
130  STOP
END

```

Файл исходных данных BUB.DAT

```

3  0.1E-3 0.1 0.5E-3 0.4 293. 6.E5 8.E-5 2. 2.
8314. 29. 3.1416 9.81 8.E-3 10
N DX Z GB0 GL0 TL0 PL0 DB0 WB0 WL0
UGC AMV PI GS DCM K

```

PROGRAM BUBBLE1

```

C  Программа позволяет выполнить расчет
C  канала с пузырьковой структурой потока.
C  Задача обратная, изотермическая, пузырек
C  воздушный, учитывается сжимаемость воздуха.
DIMENSION B(10),C(10)
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
OPEN (2,FILE='BUB1.DAT')
OPEN (8,FILE='REZBUB1.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,GB0,GL0,TL0,PL0,DB0,WB0,WL0,
& UGC,AMV,PI,GS,KK,PSR
GSM0=GB0+GL0
GCA=UGC/AMV
ROB0=PL0/TL0/GCA
SB=6.*GB0/(PI*DB0**3*ROB0)
GB10=PI*DB0**3*ROB0/6.
ROL0=RO(TL0)
FC0=GB0/WB0/ROB0+GL0/WL0/ROL0
DC0=(4.*FC0/PI)**.5
N=2
DC=DC0
PL=PL0
TL=TL0

```



```

DB=DB0
WB=WB0
WL=WL0
GB=GB0
GL=GL0
FC=FC0
SIGL=SIG(TL)
ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMV/UGC/TL
IS=0
B(1)=WB
B(2)=WL
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X    PL    WL    WB  TL    ROSM  DC
&  ROB  GB   GL   ALF   DB   ROSGR'
120  X=X+DX
     K=K+1
     DO 110 LL=1,4
     PL=PL0/((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
     PPL=-2.*PL0*(PL0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PL0/PSR-1.)
& *(X/Z)**2+1.))**2)
     ROL=RO(TL)
     ROSGR=ROL*(1.-PI*2.**.5/6.)
     VISL=VIS(TL)
     SIGL=SIG(TL)
     ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMV/UGC/TL
     FC=GB/WB/ROB+GL/WL/ROL
     DC=(4.*FC/PI)**.5
     DB=(6.*GB10*GCA*TL/(PI*PL))**0.333
     VB=SB*PI*DB**3*ROB/6.
     VL=(GSM0-GB0)/ROL
     ROSM=GSM0/(VB+VL)
     REC=WL*DC*ROSM/VISL
     CF=.0791/(REC**.25)
     TW=CF*ROSM*WL**2/2.
     REB=ABS(WL-WB)*DB*ROL/VISL
     IF(REB.GT.0.AND.REB.LE.1.)CX=24./REB
     IF(REB.GT.1.AND.REB.LE.390.)CX=24./(REB**.667)
     IF(REB.GT.390.)CX=.45
     FB=GB/ROB/WB
     FL=GL/ROL/WL

```

```

ALF=FB/FC
BO=1.+ROL/ROB/2.+ROL*WL*GB/(2.*ROB*WB*GL)
C(1)=-((ROL*WL*FC)/(2.*ROB*WB*GL)+1./ROB/WB)*PPL+
& 3.*ROL*CX*ABS(WL-WB)*(WL-WB)/(4.*ROB*WB*DB)-
& ROL*WL*TW*PI*DC/(2.*ROB*WB*GL)+GS*(ROL-ROB)
& /ROB/WB)/BO
C(2)=-((FC*PPL+TW*PI*DC+GB*C(1))/GL
110 CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
WB=B(1)
WL=B(2)
IF(K.EQ.KK)THEN
WRITE(8,200)
X,PL,WL,WB,TL,ROSM,DC,ROB,GB,GL,ALF,DB,ROSGR
K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X    PL    WL    WB  TL    ROSM  DC
& ROB  GB  GL  ALF  DB  ROSGR'
J=0
      END IF
    END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 130
200
FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.2,F6.0,F8.3,F6.3,F8.3,2F6.3,F6.3,E10.2,
&      F8.3)
130  END

```

Файл исходных данных BUB1.DAT

```

3 0.1E-3 0.1 0.5E-3 0.4 293. 6.E5 0.05E-3 2. 2.
8314. 18. 3.1416 9.81 10 4.E5
N DX Z GB0 GL0 TL0 PL0 DB0 WB0 WL0
UGC AMV PI GS KK PSR

```

PROGRAM BUBBLE2

```

C   Программа позволяет выполнить расчет
C   канала с пузырьковой структурой потока.
C   Задача прямая, изотермическая, пузырек
C   воздушный, учитывается сжимаемость воздуха.
C   Канал в виде сопла Лаваля.
DIMENSION B(10),C(10)
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
OPEN (2,FILE='BUB2.DAT')
OPEN (8,FILE='REZBUB2.DAT')
READ(2,*) N,DX,GB0,GL0,TL0,PL0,DB0,WB0,WL0,
& UGC,AMG,PI,GS,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,KK
Z=ZCC+ZCM+ZCD
GSM0=GB0+GL0
GCA=UGC/AMG
ROB0=PL0/TL0/GCA
SB=6.*GB0/(PI*DB0**3*ROB0)
GB10=PI*DB0**3*ROB0/6.
ROL0=RO(TL0)
FC0=GB0/WB0/ROB0+GL0/WL0/ROL0
DC0=(4.*FC0/PI)**.5
N=3
DC=DC0
PL=PL0
TL=TL0
DB=DB0
WB=WB0
WL=WL0
GB=GB0
GL=GL0
FC=FC0
SIGL=SIG(TL)
ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMG/UGC/TL
IS=0
B(1)=PL
B(2)=WB
B(3)=WL
J=0
K=0

```

```

X=0
WRITE(8,*)' X    PL    WL    WB TL    ROSM DC
& ROB GB  GL  ALF  DB  ROSGR'
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      ROL=RO(TL)
      ROSGR=ROL*(1.-PI*2.**.5/6.)
      VISL=VIS(TL)
      SIGL=SIG(TL)
      IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
      IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
      IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
      FC=PI*DC**2/4.
      IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
      IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM))PRFC=0.
      IF(X.GT.(ZCC+ZCM))PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))
      ROB=(PL+4.*SIGL/DB)*AMG/UGC/TL
      DB=(6.*GB10*GCA*TL/(PI*PL))**0.333
      VB=SB*PI*DB**3*ROB/6.
      VL=(GSM0-GB0)/ROL
      ROSM=GSM0/(VB+VL)
      REC=WL*DC*ROSM/VISL
      CF=.0791/(REC**.25)
      TW=CF*ROSM*WL**2/2.
      REB=ABS(WL-WB)*DB*ROL/VISL
      IF(REB.GT.0.AND.REB.LE.1.)CX=24./REB
      IF(REB.GT.1.AND.REB.LE.390.)CX=24./(REB**.667)
      IF(REB.GT.390.)CX=.45
      FB=GB/ROB/WB
      FL=GL/ROL/WL
      ALF=FB/FC
      BO=1.+ROL/ROB/2.+ROL*WL*GB/(2.*ROB*WB*GL)
      AO=GB/GL-FB*WL/(FL*WB)
      CO=BO/AO
      OPR=-((CO*FB*WL)/(ROB*GCA*TL*FL))-CO*FC/GL
& +ROL*WL*FC/(2.*ROB*WB*GL)+1./ROB/WB)
RES=3.*ROL*CX*ABS(WL-WB)*(WL-WB)/(4.*ROB*WB*DB)
FRIC=(CO-ROL*WL/(2.*ROB*WB))*TW*PI*DC/GL

```

```

ARF=GS*(ROL-ROB)/ROB/WB
GEOM=CO*WL*PRFC/FL
C(1)=- (RES+FRIC+ARF-GEOM)/OPR
C(2)=- (-(ROL*WL*FC/(2.*ROB*WB*GL)+1./ROB/WB)*C(1)+
& 3.*ROL*CX*ABS(WL-WB)*(WL-WB)/(4.*ROB*WB*DB)-
& ROL*WL*TW*PI*DC/(2.*ROB*WB*GL)+GS*(ROL-
ROB)/ROB/WB)/BO
C(3)=- (FC*C(1)+TW*PI*DC+GB*C(2))/GL
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PL=B(1)
WB=B(2)
110 WL=B(3)
IF(K.EQ.KK)THEN
WRITE(8,200)
X,PL,WL,WB,TL,ROSM,DC,ROB,GB,GL,ALF,DB,ROSGR
K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' X    PL    WL    WB  TL    ROSM  DC
& ROB  GB  GL  ALF  DB  ROSGR'
J=0
      END IF
    END IF
IF(X.LT.Z) GOTO 120
IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 130
200  FORMAT(F6.3,F10.0,2F8.2,F6.0,F8.3,F6.3,F8.3,2F6.3,
& F6.3,E10.2,F8.3)
130  END
Файл исходных данных BUB2.DAT
3  0.1E-3  0.8E-3  0.4  293.  6.E5  8.E-5  2.  2.
8314. 29. 3.1416 9.81 9.E-3 1.8E-2 4.E-2 2.E-3 0.1 2
N  DX    GB0  GL0  TL0  PL0    DB0  WB0  WL0
UGC  AMV  PI  GS  DCM  DCSR  ZCC  ZCM  ZCD K

```

PROGRAM BUBBLE3

```

С    Программа позволяет выполнить расчет
С    канала с пузырьковой структурой потока.
С    Задача прямая, неизотермическая, пузырек
С    воздушный, учитывается сжимаемость воздуха.
С    Канал в виде сопла Лаваля.
REAL MAX,ADK,LAML,ISM0
DIMENSION B(10),C(10)

```

```

RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
OPEN (2,FILE='BUB3.DAT')
OPEN (8,FILE='REZBUB3.DAT')
READ(2,*) N,DX,GB0,GL0,TB0,TL0,PL0,DB0,WL0,
& UGC,AMV,PI,ADK,LAML,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,KK
Z=ZCC+ZCM+ZCD
SIGL0=SIG(TL0)
CPG=ADK*UGC/((ADK-1.)*AMV)
GSM0=GB0+GL0
ISM0=GB0*CPG*(TB0-273.)+GL0*CPL(TL0)*(TL0-273.)+
& GSM0*WL0**2/2.
GCA=UGC/AMV
PB0=PL0+4.*SIGL0/DB0
ROB0=PB0*AMV/UGC/TB0
GB10=PI*DB0**3*ROB0/6.
ROL0=RO(TL0)
FC0=GB0/WL0/ROB0+GL0/WL0/ROL0
DC0=(4.*FC0/PI)**.5
N=3
DC=DC0
PL=PL0
TL=TL0
DB=DB0
TB=TB0
WL=WL0
GB=GB0
GL=GL0
FC=FC0
IS=0
B(1)=PL
B(2)=WL
B(3)=TB
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X    PL    WL    TL    TB    DC    ROB
& GB  GL    ASM  DB    ROSM ROSGR  MAX    CRM
&SM  ALFALB  ALF  ALFA'
120  X=X+DX

```

```

K=K+1
DO 110 LL=1,4
  TL=(ISM0-GB0*CPG*(TB-273.)-GSM0*WL**2/2)/GL0/CPL(TL)
& +273.
  ROL=RO(TL)
  ROSGR=ROL*(1.-PI*2.**.5/6.)
  VISL=VIS(TL)
  SIGL=SIG(TL)
  PB=PL+4.*SIGL/DB
  ROB=PB*AMV/UGC/TB
  IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
  IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
  IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
  FC=PI*DC**2/4.
  IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
  IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM))PRFC=0.
  IF(X.GT.(ZCC+ZCM))PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))
  DB=(6.*GB10*GCA*TB/(PI*PB))**0.333
  ROSM=ROB*ROL/(ROB+GB0*(ROL-ROB)/GSM0)
  REC=WL*DC*ROSM/VISL
  CF=.0791/(REC**.25)
  WSM=((GB0*WL**2+GL0*WL**2)/(GB0+GL0))**0.5
  TW=CF*ROSM*WL**2/2.
  FB=GB/ROB/WL
  ALF=FB/FC
  SA=(ADK*UGC*TB/AMV)**0.5
  Y=(TL-273.)/100.
  AL=1429.00787+595.633911*Y-749.205444*Y**2+394.216553*
& Y**3-109.585632*Y**4+11.354808*Y**5
  XG=GB0/GSM0
  ALFA=(ROL-ROB*ROL/(ROB+XG*(ROL-ROB)))/(ROL-ROB)
  ASM=1./(((ALFA*ROB+(1.-
ALFA)*ROL)*(ALFA/(ROB*SA**2)+
& (1.-ALFA)/(ROL*AL**2))))**0.5)
  WSM=GSM0/FC/ROSM
  CRM=WSM/ASM
  MAX=WL/SA
  OPR=MAX**2-ROB*FC/ROSM/FB
  FRIC=WL*ROB*FC*TW*PI*DC/GSM0/FB

```

```

GEOM=ROB*WL**2*PRFC/FB
ALFALB=2.*LAML/DB
HEAT=6.*ALFALB*(TL-TB)*(ADK-1.)*MAX**2/WL/DB
C(1)=(HEAT+FRIC-GEOM)/OPR
C(2)=- (FC*C(1)+TW*PI*DC)/GSM0
C(3)=(6.*ALFALB*(TL-TB)/ROB/WL/DB+C(1)/ROB)/CPG
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PL=B(1)
WL=B(2)
110  TB=B(3)
      IF(K.EQ.KK)THEN
        WRITE(8,200)
X,PL,WL,TL,TB,DC,ROB,GB,GL,ASM,DB,ROSM,
  & ROSGR,MAX,CRM,WSM,ALFALB,ALF,ALFA
      K=0
      J=J+1
      IF(J.EQ.10) THEN
        WRITE(8,*)' X    PL    WL    TL    TB    DC    ROB
& GB  GL    ASM  DB    ROSM ROSGR  MAX    CRM
C
        &SM ALFALB  ALF  ALFA'
        J=0
          END IF
        END IF
        IF(X.LT.Z) GOTO 120
        IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 130
200  FORMAT(F6.3,F10.0,F8.2,2F6.0,F6.3,F8.3,F8.4,F6.3,F8.3,E10.2,
&2F8.3,F6.2,3F9.2,2F8.2)
130  STOP
      END

```

Файл исходных данных BUB3.DAT

3 0.1E-3 0.4E-3 0.4 360. 363. 6.E5 8.E-4 2.

8314. 29. 3.1416 1.4 0.68 6.E-3 8.E-3 4.E-2 2.E-3 0.1 2

N DX GB0 GL0 TB0 TL0 PL0 DB0 WL0

UGC AMV PI KG LAML DCM DCSR ZCC ZCM ZCD KK

PROGRAM BUBBLE4

```

C  Программа позволяет выполнить расчет
C  канала с пузырьковой структурой потока.
C  Задача обратная, неизотермическая, пузырек
C  воздушный.
REAL ADK,LAML,ISM0

```



```

DIMENSION B(10),C(10)
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
OPEN (2,FILE='BUB4.DAT')
OPEN (8,FILE='REZBUB4.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,GB0,GL0,TB0,TL0,PL0,PSR,DB0,WL0,
& UGC,AMV,PI,ADK,LAML,KK
SIGL0=SIG(TL0)
CPG=ADK*UGC/((ADK-1.)*AMV)
GSM0=GB0+GL0
ISM0=GB0*CPG*(TB0-273.)+GL0*CPL(TL0)*(TL0-273.)+
& GSM0*WL0**2/2.
GCA=UGC/AMV
PB0=PL0+4.*SIGL0/DB0
ROB0=PB0*AMV/UGC/TB0
SB=6.*GB0/(PI*DB0**3*ROB0)
GB10=PI*DB0**3*ROB0/6.
ROL0=RO(TL0)
FC0=GB0/WL0/ROB0+GL0/WL0/ROL0
DC0=(4.*FC0/PI)**.5
N=2
DC=DC0
PL=PL0
TL=TL0
DB=DB0
TB=TB0
WL=WL0
GB=GB0
GL=GL0
FC=FC0
ROB=ROB0
IS=0
B(1)=WL
B(2)=TB
J=0
K=0
WRITE(8,*)' X   PL   WL  TL  TB  DC   ROB
& GB  GL  DB   ROSM ROSGR  SB   ALF  ALFA
&LG'
X=0

```

```

120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      PL=PL0/((PL0/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
      PPL=-2.*PL0*(PL0/PSR-1.)*X/(Z**2*((PL0/PSR-1.)
& *(X/Z)**2+1.))
      TL=(ISM0-GB0*CPG*(TB-273.)-GSM0*WL**2/2)/GL0/CPL(TL)
& +273.
      ROL=RO(TL)
      ROSGR=ROL*(1.-PI*2.**.5/6.)
      VISL=VIS(TL)
      SIGL=SIG(TL)
      PB=PL+4.*SIGL/DB
      ROB=PB*AMV/UGC/TB
      FC=GB0/WL/ROB+GL0/WL/ROL
      DC=(4.*FC/PI)**.5
      ALFALG=2.*LAML/DB
      DB=(6.*GB10*GCA*TB/(PI*PB))**0.333
      ROSM=ROB*ROL/(ROB+GB0*(ROL-ROB)/GSM0)
      REC=WL*DC*ROSM/VISL
      CF=.0791/(REC**.25)
      TW=CF*ROSM*WL**2/2.
      FB=GB/ROB/WL
      ALF=FB/FC
      C(1)=-((FC*PPL+TW*PI*DC)/GSM0)
      C(2)=(6.*ALFALG*(TL-TB)/ROB/WL/DB+PPL/ROB)/CPG
110  CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
      WL=B(1)
      TB=B(2)
      IF(K.EQ.KK)THEN
        WRITE(8,200) X,PL,WL,TL,TB,DC,ROB,GB,GL,DB,ROSM,
& ROSGR,SB,ALF,ALFALG
        K=0
        J=J+1
        IF(J.EQ.10) THEN
          WRITE(8,*)' X   PL   WL   TL   TB   DC   ROB
& GB   GL   DB   ROSM ROSGR   SB   ALF   ALFA
&LG'
          J=0
          END IF
        END IF
      IF(X.LT.Z) GOTO 120

```

```

      IF(ROSM.GE.ROSGR) GOTO 130
200  FORMAT(F6.3,F10.0,F8.3,2F6.0,F6.3,F8.3,E10.2,F6.3,
      & E10.2,2F8.2,3E10.2)
130  STOP
      END

```

Файл данных BUB4.DAT

```

2 0.1E-3 0.144 0.4E-3 0.4 360. 363. 6.E5 1.E5 8.E-4 2.
8314. 29. 3.1416 1.4 0.68 10

```

```

N DX  Z  GB0 GL0 TB0 TL0 PL0 PSR  DB0 WL0
UGC AMV PI  KG LAML KK

```

Идентификаторы программы ASMB

AV- скорость распространения звука в водяном паре

AL- скорость распространения звука в воде

ASM- скорость распространения звука в пузырьковой структуре

ALFA- объемная доля газа в смеси, α

DALFDP- производная $d\alpha/dp$

PROGRAM ASMB

C Программа позволяет, используя формулу Вуда,

C определить скорость звука в пузырьковой структуре.

C

```

      RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
      PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A
& -11.48776*ALOG(A))
      OPEN (2,FILE='AS.DAT')
      OPEN (6,FILE='REZAS.DAT')
      READ(2,*) T
      WRITE(6,*) ' ALFA   ASM'
      J=0
      DO 1 I=0,100
      J=J+1
      ALFA=I*1.E-2
      P=PS(T)
      ROV=RO(T)
      ROV=1.213E-5*((T-273.)/5.677)**3.75
      Y=(T-273.)/100.
      AV=(1.25*P/ROV)**0.5+13.36363636-0.036363636*(T-273.)
      AL=1429.00787+595.633911*Y-749.205444*Y**2+394.216553*
& Y**3-109.585632*Y**4+11.354808*Y**5

```

```

      ASM=1./(((ALFA*ROV+(1.-
ALFA)*ROL)*(ALFA/(ROV*AV**2)+
      & (1.-ALFA)/(ROL*AL**2))))**0.5)
      DALFDP=ALFA*(1.-ALFA)*(1./(ROL*AL**2)-
1./(ROV*AV**2))
      ASM1=1./(((ROV-ROL)*DALFDP+ALFA/(AV**2)+(1.-ALFA)/
      & (AL**2))**0.5)
      ASM2=AV*(ROV/(ALFA*(ROL-(ROL-ROV)*ALFA)+(1.-
ALFA)*ROV*
      & AV**2/(AL**2)))*0.5
      ALFMIN=(1-ROV*AV**2/(ROL*AL**2))/(2.*(1.-ROV/ROL))
      WRITE(6,200) ALFA,ASM
      IF(J.EQ.10)THEN
      WRITE(6,*)' ALFA   ASM '
      J=0
      END IF
1   CONTINUE
200  FORMAT(F6.3,5X,E10.3)
      STOP
      END

```

Файл данных AS.DAT
373.
T

Идентификаторы программ SSC1_FR, SCCA, SCC2, SCC2PI

XV1- степень сухости пара перед скачком конденсации
ENTSM1,IMP1- энтальпия и импульс пароводяной смеси перед скачком
FAN- плотность потока смеси
ASMV- скорость распространения звука по Вуду
SA- термодинамическая скорость звука

PROGRAM SSC1_FR

```

REAL IV,IMP1,ISTA,MAX,ISM
CP(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
ROL(A)=1008.7-0.288*(A-273.)-2.16E-3*(A-273.)**2
R(A)=(2453.-1.36*(A-273.)-6.E-3*(A-273.)**2)*1.E3
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2

```

```

YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SL(A)=0.087725+0.0131875*(A-273.)-9.9375E-6*(A-273.)**2
SV(A)=8.764128-0.0165849*(A-273.)+2.49062E-5*(A-273.)**2
PV(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A-
& 11.48776*ALOG(A))
OPEN(2,FILE='SCFR1.DAT')
OPEN(8,FILE='REZSCFR1.DAT')
READ(2,*) T1,DC,PI,GSM
P1=PV(T1)
ROV1=1.1203E-5*P1**0.9435
ROL1=ROL(T1)
XV1=ROV1/(ROL1-ROV1)
ENTSM1=(1.-XV1)*YIL(T1)+XV1*IV(T1)
ROSM1=ROL1/2.
VSM1=1./ROSM1
FC=PI*DC**2/4.
WSM1=GSM/FC/ROSM1
ISTA=ENTSM1+WSM1**2/2.
IMP1=P1+ROSM1*WSM1**2
FAN=GSM/FC
WRITE(8,*)' P T XV WSM VSM ISM
& SSM PSC SA MAX ASMV VMAX ALFA PSTAR
ROSM'
J=0
DO 1 I=1,80
J=J+1
T=T1+0.01*I
P=PV(T)
ROV=1.1203E-5*P**0.9435
VV=1./ROV
VL=1./ROL(T)
XV=(2.*(ISTA-YIL(T))-(IMP1-P)*VL)/
& (2.*(IV(T)-YIL(T))+IMP1*(VV-VL)-P*(VV-VL))
IF(XV.LT.0) STOP
VSM=VL+XV*(VV-VL)
ISM=ENTSM1+(VSM1+VSM)*(VSM1-VSM)*FAN**2/2.
PSC=P1+(VSM1-VSM)*FAN**2
SSM=SL(T)+XV*(SV(T)-SL(T))

```

```

ROSM=ROL(T)*ROV/(ROV+XV*(ROL(T)-ROV))
WSM=GSM/ROSM/FC
CVSM=(1.-XV)*CVL(T)+XV*CVV(T)
SA=VSM*R(T)/(VV-VL)/((CVSM*T)**0.5)
MAX=WSM/SA
PSTAR=PSC+ROSM*WSM**2/2.
GV=GSM*XV
ALFA=GV*ROSM/ROV/GSM
Y=(T-273.)/100.
AV=(1.25*P/ROV)**0.5+13.36363636-0.036363636*(T-273.)
AL=1429.00787+595.633911*Y-749.205444*Y**2+394.216553*
& Y**3-109.585632*Y**4+11.354808*Y**5
ALFA=(ROL(T)-ROV*ROL(T)/(ROV+XV*(ROL(T)-
ROV)))/(ROL(T)-ROV)
ASMV=1./(((ALFA*ROV+(1.-
ALFA)*ROL(T))*(ALFA/(ROV*AV**2)+
& (1.-ALFA)/(ROL(T)*AL**2))))**0.5)
VMAX=WSM/ASMV
WRITE(8,200)
P,T,XV,WSM,VSM,ISM,SSM,PSC,SA,MAX,ASMV,
& VMAX,ALFA,PSTAR,ROSM
IF(J.EQ.10)THEN
WRITE(8,*)' P T XV WSM VSM ISM
& SSM PSC SA MAX ASMV VMAX ALFA PSTAR
ROSM'
J=0
ENDIF
1 CONTINUE
200 FORMAT(F10.0,F6.0,E10.3,F8.3,F6.3,E10.3,F8.3,E10.3,F6.3,
& F5.1,2F8.3,F6.3,E10.3,F8.2)
STOP
END
Файл исходных данных
346.36 4.5E-3 3.1416 0.415
T1 DC PI GSM

```

Идентификаторы программы SCCA

BETA- истинное паросодержание

```

PROGRAM SCCA
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN(2,FILE='SCCNDA.DAT')
OPEN(8,FILE='REZSCA.DAT')
READ(2,*) GSM,Z0,D,PI,P1,DB1
F=PI*D**2/4.
TV1=5.632*P1**0.25+273.
ROV1=1.213E-5*((TV1-273.)/5.677)**3.75
ROL1=RO(TV1)
ROSM1=ROL1/2.
WSM1=GSM/ROSM1/F
X1=ROV1/(ROL1-ROV1)
SB=6.*GSM*X1/PI/(DB1**3)/ROV1
ROSG=ROL1*(1.-PI*(2.**0.5)/6.)
P=P1
J=0
WRITE(8,*)' Z    P    SB    ROSM    WSM    DB
& FV    ROSG    TV    XV    FL    ROV    ALFA    BETA'
DO 2 I=1,201
Z=(I-1)*1.E-4
DB=DB1*(1.-Z/Z0)
TV=5.632*P**0.25+273.
ROV=1.213E-5*((TV1-273.)/5.677)**3.75
XV=ROV*PI*DB**3*SB/GSM/6.
ROSM=ROL1*ROV/((1.-XV)*ROV+XV*ROL1)
ALFA=XV*ROSM/ROV
WSM=WSM1*ROSM1/ROSM
P=P1+ROSM1*WSM1**2-ROSM*WSM**2
FV=PI*DB**3*SB/WSM/6.
FL=F-FV
BETA=FV/F
WRITE(8,200)
Z,P,SB,ROSM,WSM,DB,FV,ROSG,TV,XV,FL,ROV,ALFA,BETA
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' Z    P    SB    ROSM    WSM    DB
& FV    ROSG    TV    XV    FL    ROV    ALFA    BETA'
J=0
END IF
IF(Z.EQ.19.9E-3) GOTO 3
2 CONTINUE
200 FORMAT(F6.4,F10.0,E10.2,2F8.3,2E10.2,F8.3,F6.0,2E10.2,F8.3,

```

```

&2F6.3)
3  STOP
  END

```

Файл исходных данных

```

0.415 20.E-3 4.5E-3 3.1416 36.E3 8.E-5
GSM Z0      D      PI   P1   DB1

```

PROGRAM SCC2

```

RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VI(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
OPEN(2,FILE='SCCOND2.DAT')
OPEN(8,FILE='REZSCND2.DAT')
READ(2,*) GSM,Z0,D,PI,P1,DB1,TL1,AMV
F=PI*D**2/4.
TV1=5.6322*P1**0.25+273.
ROV1=1.213E-5*((TV1-273.)/5.6322)**3.75
ROL1=RO(TL1)
X1=ROV1/(ROL1-ROV1)
GVB1=GSM*X1
GL1=GSM-GVB1
PB1=P1+4.*SIG(TL1)/DB1
TVB1=5.6322*PB1**0.25+273.
ROVB1=1.213E-5*((TVB1-273.)/5.6322)**3.75
WSM1=2.*GSM/ROL1/F
ISTAR1=GVB1*(VI(TVB1)+WSM1**2/2.)+GL1*(YIL(TL1)
& +WSM1**2/2.)
SB=6.*GSM*X1/PI/(DB1**3)/ROVB1
ROSG=ROL1*(1.-PI*(2.**0.5)/6.)
TL=TL1
J=0
WRITE(8,*)' Z   WSM   P   ROSM   PB   DB
&  FV   FL   XV   ROV   ROSG   ROVB   TV   TVB   TL
&  R0   DLT'
DO 2 I=1,201
J=J+1
Z=(I-1)*1.E-4

```



```

DB=DB1*(1.-Z/Z0)
WSM=GSM*(1.+(1.-Z/Z0)**3)/ROL1/F
ROSM=GSM/F/WSM
FV=PI*DB**3*SB/WSM/6.
FL=F-FV
P=P1+GSM*(WSM1-WSM)/F
TV=5.6322*P**0.25+273.
ROV=1.213E-5*((TV-273.)/5.6322)**3.75
PB=P+4.*SIG(TL)/DB
TVB=5.6322*PB**0.25+273.
ROVB=1.213E-5*((TVB-273.)/5.6322)**3.75
GVB=PI*DB**3*ROVB*SB/6.
GL=GSM-GVB
XV=GVB/GSM
ALFA=FV/F
TL=((ISTAR1-(VI(TVB)+WSM**2/2.)*GVB)/GL-
WSM**2/2.)/CPL(TL)+273.
PSTAR=P+ROSM*WSM**2/2.
R0=PB*AMV/ROVB/TVB
DLT=TL-TL1
IF(J.EQ.10)THEN

WRITE(8,200)Z,WSM,P,ROSM,PB,DB,FV,FL,XV,ROV,ROSG,ROVB,
TV,TVB,TL,
& R0,DLT
J=0
        END IF
        IF(Z.EQ.19.9E-3) GOTO 3
2    CONTINUE
200  FORMAT(F6.3,F8.2,F10.0,F8.3,F10.0,3E10.3,F6.3,3F8.3,
&3F6.0,F8.1,F8.3)
3    STOP
    END

Файл исходных данных
0.415 20.E-3 4.5E-3 3.1416 36.E3 8.E-5
346.36 18.
GSM Z0 D PI P1 DB1
TL1 AMV

PROGRAM SCC2PI
DIMENSION B(10),C(10)
REAL LAMLS,IMP1,IMP,MAX

```

```

VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
VI(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A
& -11.48776*ALOG(A))
OPEN (2,FILE='SC2PI.DAT')
OPEN (8,FILE='REZSC2PI.DAT')
READ(2,*) N,DX,GSM,TL1,P1,DB1,
& DC1,DCM,DCSR,ZCC,ZCM,ZCD,UGC,AMV,PI,B1,B2,
& LAMLS,KK
N=2
Z=ZCC+ZCM+ZCD
FC1=PI*DC1**2/4.
ROL1=RO(TL1)
SIGL1=SIG(TL1)
PB1=P1+4.*SIGL1/DB1
TVB1=5.6322*PB1**0.25+273.
ROVB1=1.213E-5*((TVB1-273.)/5.6322)**3.75
XV1=ROVB1/(ROL1-ROVB1)
GVB1=XV1*GSM
ROSM1=ROVB1*ROL1/(ROVB1+GVB1*(ROL1-ROVB1)/GSM)
WSM1=GSM/ROSM1/FC1
IMP1=GSM*WSM1+FC1*P1
SB=6.*GSM*XV1/PI/(DB1**3)/ROVB1
GL1=GSM-GVB1
ISTAR1=GVB1*(VI(TVB1)+WSM1**2/2.)+GL1*(YIL(TL1)+
& WSM1**2/2.)
P=P1
ROL=ROL1
TL=TL1
DB=DB1
WSM=WSM1
ROSM=ROSM1
GVB=GVB1
XV=XV1
FC=FC1
IMP=IMP1
GCV=UGC/AMV

```

```

IS=0
B(1)=DB
B(2)=IMP
J=0
K=0
X=0
WRITE(8,*)' X    P    WSM  GVB  TL  ROSM  D
&TPL  DB    TVB  XV    AV  ALFA  ASM  MAX  RJDL'
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      SIGL=SIG(TL)
      VISL=VIS(TL)
      ROL=RO(TL)
      PB=P+4.*SIGL/DB
      CAP=B2/(PB**0.56)
      ROVB=1.213E-5*PB**0.9375
      TVB=5.6322*PB**0.25+273.
      GVB=SB*PI*DB**3*ROVB/6.
      XV=GVB/GSM
      ROSM=ROVB*ROL/(ROVB+GVB*(ROL-ROVB)/GSM)
      IF(X.LT.ZCC) DC=DC1-(DC1-DCM)*X/ZCC
      IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
      IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
      FC=PI*DC**2/4.
      IF(X.LT.ZCC)PRFC=-PI*(DC1-(DC1-DCM)*X/ZCC)*(DC1-
DCM)/2./ZCC
      IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM))PRFC=0.
      IF(X.GT.(ZCC+ZCM))PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))
      DTPL=TL-TVB
      SQ=SQV(TVB)
      CPLIT=CPL(TL)
      WSM=GSM/ROSM/FC
      REC=WSM*DC*ROSM/VISL
      CF=0.0791/(REC**0.25)
      TW=CF*ROSM*WSM**2/2.
      GL=GSM-GVB
      TL=((ISTAR1-(VI(TVB)+WSM**2/2.)*GVB)/GL-
WSM**2/2.)/CPLIT+273.
      CAP=B2/(P**0.56)

```

```

RJDLCAP*(PB/(TVB**0.5)-
PS(TL)/(TL**0.5))/((2.*PI*GCV)**0.5)
Y=(TL-273.)/100.
AV=(1.25*PB/ROVB)**0.5+13.36363636-0.03636363636*(TVB-
273.)
AL=1429.00787+595.633911*Y-749.205444*Y**2+394.216553*
& Y**3-109.585632*Y**4+11.354808*Y**5
ALFA=(ROL-ROVB*ROL/(ROVB+XV*(ROL-ROVB)))/(ROL-
ROVB)
ASM=1./(((ALFA*ROVB+(1.-
ALFA)*ROL)*(ALFA/(ROVB*AV**2)+
& (1.-ALFA)/(ROL*AL**2))))**0.5)
DALFDP=ALFA*(1.-ALFA)*(1./(ROL*AL**2)-
1./(ROVB*AV**2))
ASM1=1./(((ROVB-ROL)*DALFDP+ALFA/(AV**2)+(1.-ALFA)/
& (AL**2))**0.5)
ASM2=AV*(ROVB/(ALFA*(ROL-(ROL-ROVB)*ALFA)+(1.-
ALFA)*ROVB*
& AV**2/(AL**2))**0.5)
ALFMIN=(1-ROVB*AV**2/(ROL*AL**2))/(2.*(1.-ROVB/ROL))
MAX=WSM/ASM
OPR=WSM**2/(ASM**2)-1.
C(1)=8.*LAMLS*CPLIT*RO(TVB)*DTPL*ABS(DTPL)*B1/
& (SQ**2*ROVB**2*DB*WSM)
C(2)=-TW*PI*DC
CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
DB=B(1)
110 IMP=B(2)
P=(IMP-GSM**2/FC/ROSM)/FC
WSM=GSM/FC/ROSM
PSTAR=P+ROSM*WSM**2/2.
IF(K.EQ.KK)THEN
WRITE(8,200) X,P,WSM,GVB,TL,ROSM,DTPL,DB,TVB,XV,AV,
& ALFA,ASM,MAX,RJDLC
J=J+1
K=0
IF(J.EQ.10)THEN
J=0
WRITE(8,*)' X P WSM GVB TL ROSM D
&TPL DB TVB XV AV ALFA ASM MAX RJDLC'
END IF
END IF

```

```

      IF(GVB.EQ.0) GOTO 16
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
      IF(X.GT.Z) GOTO 16
200  FORMAT(F6.4,F10.0,F6.1,E10.3,F6.0,F8.3,E12.3,E10.3,
      & F6.0,E10.3,F6.0,F6.3,F8.1,2F7.3)
16   STOP
      END

```

Файл исходных данных

```

2 0.1E-3 0.415 346.36 36.E3 8.E-5
4.5E-3 4.5E-3 1.E-2 0.0 1.E-2 0.05
8314. 18. 3.1416 0.00195 1. 0.68 2
N DX GSM TL0 P0 DB0
DC0 DCM DCSR ZCC ZCM ZCD
UGC AMV PI B1 B2 LAMLS KK

```

PROGRAM TAU_BUBBLE

C Программа позволяет определить время схлопывания
C пузырька под действием заданной разности давлений в пу-
C зырьке и воде (Рп меньше Рж).
C

```

      ROL(A)=1008.7-0.288*(A-273.)-2.16E-3*(A-273.)**2
      P(T0)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*T0-7821.541/T0
& -11.48776*ALOG(T0))
      F(C)=C**1.5*((1.-C)/(1.-C**3))**0.5
      OPEN(2,FILE='TAU.DAT')
      OPEN(4,FILE='PRN')
      OPEN(6,FILE='CON')
      OPEN(8,FILE='TAUREZ.DAT')
      READ(2,*) RB0,DLP,T0
      ROV=1.1203E-5*PB0**0.9435
      PL=P(T0)
      PB0=PL-DLP
      C0=RB0*(3.*ROL(T0)/DLP/2.)**0.5
      RB=2E-6
      RBOT=RB/RB0
      PRINT*, ' DLP=',DLP,' PL=',PL,' C0=',C0,' RBOT=',RBOT
      A=RBOT
      B=0.999
      S1=F(A)
      N=100
      D=(B-A)/N
      S=(F(A)+F(B))/2

```

```

X=A
DO 2 I=1,99
X=X+D
2   S=S1+X**1.5*((1.-X)/(1.-X**3))**0.5
    S=S*D
    TAU=S*C0
    WRITE(8,*) ' TAU=',TAU,' C0=',C0,' PL=',PL,' S=',S
    STOP
    END
Файл TAU.DAT
2.E-3 0.5E5 373.
RB0 DLP T0

```

```

Файл TAUREZ.DAT
TAU= 1.9325557E-06 C0= 3.3911061E-04 PL= 100779.5
S= 5.6988946E-06

```

```

PROGRAM CAV_1
C   Программа позволяет выполнить расчет
C   роста пузырька под действием инерционных, поверхностных
C   и вязкостных сил при заданной разности давлений в пу-
C   зырьке и воде (Рп больше Рж).

```

Идентификаторы программы

N- число дифференциальных уравнений системы
DTAU- шаг интегрирования по времени $\Delta \tau$, с
DLP- перепад давления между пузырьком и жидкостью
RB- радиус пузырька
SIG- коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м
TAU- время, с
TL- температура жидкости, К
UB- скорость перемещения поверхности пузырька, м/с
VISL- коэффициент абсолютной вязкости жидкости, Па·с
PI- число “пи”
AMV- молекулярная масса пара, μ_r , кг/кмоль
UGC-универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(кмоль К)
KK- интервал для выдачи результатов расчета (через каждые KK шагов)
DIMENSION B(10),C(10)
REAL IVTV,ISM, LAMV,LAM,IV,LBFI
YILT(A)=(12.475+3.935*(A-273.))+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3

```

IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.)+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
LAML(A)=0.57225+1.92E-3*(A-273.)-8.1E-6*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314e-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
ROP(A)=6.7962-0.129299*(A-273.)+6.7314e-4*(A-273.)**2
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/
& A-11.48776*ALOG(A))
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='CAV.DAT')
OPEN (4,FILE='GRAF.DAT')
OPEN (8,FILE='REZCAV.DAT')
READ(2,*)
N,TAU0,DTAU,DLP,UB0,RB0,TL,UGC,AMV,PI,TAUM,KK
GCA=UGC/AMV
N=2
IS=0
UB=UB0
RB=RB0
TAU=TAU0
B(1)=URB
B(2)=RB
J=0
K=0
120  TAU=TAU+DTAU
     K=K+1
     DO 110 LL=1,4
       C(1)=DLP/RO(TL)/RB-3.*C(2)**2/RB/2.-2.*SIG(TL)/(RO(TL)*
& RB**2)-4.*VISL(TL)*C(2)/(RO(TL)*RB**2)
       C(2)=URB
110  CALL RKM(TAU,DTAU,N,IS,B,C)
     URB=B(1)
     RB=B(2)
     IF(K.EQ.KK) THEN
       PRINT *, " TAU=",TAU," URB=",URB," RB=",RB
     K=0
     J=J+1

```

```

IF(J.EQ.10) THEN
  J=0
  ENDIF
END IF
WRITE(4,*) TAU,URB,RB
WRITE(8,*) 'TAU=',TAU,'URB=',URB,'RB=',RB,
& 'TAUM=',TAUM,'C(1)=',C(1),'C(2)=',C(2)
IF(RB.LT.1E-5) GOTO 130
IF(TAU.LT.TAUM) GOTO 120
130 STOP
END
SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
IS=IS+1
GOTO(10,30,60,80),IS
10 E=A
DO 20 I=1,N
  F(I)=B(I)
  G(4*I-3)=C(I)*DX
20 B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
  GOTO 50
30 DO 40 I=1,N
  G(4*I-2)=C(I)*DX
40 B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50 A=E+DX/2.
  GOTO 100
60 DO 70 I=1,N
  G(4*I-1)=C(I)*DX
70 B(I)=F(I)+G(4*I-1)
  A=E+DX
  GOTO 100
80 DO 90 I=1,N
  G(4*I)=C(I)*DX
  B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90 B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
  IS=0
100 RETURN
END
Файл CAV.DAT
2 0.0 0.1E-6 0.4E5 0.0 1.E-5 293. 8314. 18. 3.1416 0.01 10
N TAU0 DTAU DLP URB0 RB0 TL UGC AMV PI TAUM KK

```


PROGRAM CAV_2

С Программа позволяет выполнить расчет
 С "схлопывания" пузырька под действием инерционных,
 С поверхностных
 С и вязкостных сил при заданной разности давлений в воде и пу-
 С зырьке ($P_{ж}$ больше $P_{п}$).
 С

```

DIMENSION B(10),C(10)
REAL LAM,IV
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.)+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
LAML(A)=0.57225+1.92E-3*(A-273.)-8.1E-6*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
ROP(A)=6.7962-0.129299*(A-273.)+6.7314E-4*(A-273.)**2
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/
& A-11.48776*ALOG(A))
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='CAV_2.DAT')
OPEN (4,FILE='GRAF.DAT')
OPEN (8,FILE='REZCAV_2.DAT')
READ(2,*)
N,TAU0,DTAU,DLP,UB0,RB0,TL,UGC,AMV,PI,TAUM,KK
GCA=UGC/AMV
N=2
IS=0
UB=UB0
RB=RB0
TAU=TAU0
B(1)=URB
B(2)=RB
J=0
K=0
120 TAU=TAU+DTAU
K=K+1

```

```

DO 110 LL=1,4
  C(1)=-DLP/RO(TL)/RB-3.*C(2)**2/RB/2.-2.*SIG(TL)/(RO(TL)*
& RB**2)-4.*VISL(TL)*C(2)/(RO(TL)*RB**2)
  C(2)=URB
110  CALL RKM(TAU,DTAU,N,IS,B,C)
      URB=B(1)
      RB=B(2)
C    Энергия которой обладает жидкость
      EN=2.*PI*RO(TL)*URB**2*RB**3
C    Ускорение поверхности пузырька
      AB=-DLP/RB/RO(TL)-3.*URB**2/2./RB-
2*SIG(TL)/RB**2/RO(TL)-
& 4.*VISL(TL)*URB/RB**2/RO(TL)
C    Ускорение поверхности пузырька без учета SIG и VISL.
      AB1=-3.*URB**2/2./RB
C    Радиус сферы RSTA вокруг пузырька, при котором давление
C    в жидкости достигает максимального значения.
      CHI=2.*URB**2
      ZN=2.*URB**2+RB*AB

IF(ZN.GT.0.)RSTA=RB*(2.*URB**2/(2.*URB**2+RB*AB))**0.33
  IF(ZN.LT.0.)RSTA=0.1
C    Максимальное давление в жидкости PSTA на радиусе RSTA.
      PL=1.E5
      PSTA=(3.*RB*(2.*URB**2+RB*AB)/4./RSTA)*RO(TL)+PL
      ROTST=RSTA/RB
C    Скорость границы пузырька при изменении радиуса от RB0 до
RB1
      RB1=0.305E-4
      URB1=(2.*DLP*RB0**3/3./RO(TL)/RB1**3*(1.-(RB1/RB0)**3)/
& (1.-RB1/RB0))**0.5
      IF(K.EQ.KK) THEN
        PRINT *, " TAU=",TAU," URB=",URB," RB=",RB
        K=0
        J=J+1
        IF(J.EQ.10) THEN
          J=0
          ENDIF
        END IF
      WRITE(4,*) TAU,URB,RB
      WRITE(8,*) ' TAU=',TAU,' URB=',URB,' RB=',RB , ' AB=',AB,

```

```

      & ' AB1=',AB1,' TAUM=',TAUM,' C(1)=',C(1),' C(2)=',C(2),'
EN=',EN,
      & ' RSTA=',RSTA,' PSTA=',PSTA,' ROTST=',ROTST,' ZN=',ZN,
      & ' CHI=',CHI,' URB1=',URB1
      IF(RB.LE.0.5E-4) GOTO 130
      IF(TAU.LT.TAUM) GOTO 120
130  STOP
      END
      SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
      IS=IS+1
      GOTO(10,30,60,80),IS
10   E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20   B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30   DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40   B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50   A=E+DX/2.
      GOTO 100
60   DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70   B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80   DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90   B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100  RETURN
      END
      Файл CAV.DAT
2 0.0 0.1E-6 0.4E5 0.0 10.E-3 293. 8314. 18. 3.1416 0.01 10
N TAU0 DTAU DLP URB0 RB0 TL UGC AMV PI TAUM KK

```

- С Рассматривается образование новой фазы (паровых пузырьков)
- С в холодной воде при ее движении в трубке Вентури.
- С Учитывается скольжение между фазами . Задан закон
- С изменения статического давления вдоль канала.

Идентификаторы программы VENT_23

- N- число дифференциальных уравнений системы
- DX- шаг интегрирования Δx , м
- BN- число Больцмана- $1,38 \cdot 10^{-23}$, Дж/К
- DVCR- критический диаметр пузырька, м
- DB- диаметр пузырька, м
- DN- диаметр канала, м
- DG- диаметр “горла” трубки Вентури, м
- DIF- коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$
- ALFA-коэффициент теплоотдачи, $\text{Ватт} / (\text{м}^2 \text{ гр})$
- BETA- коэффициент массопереноса, $\text{м}/\text{с}$
- CB- скорость пузырька, $\text{м}/\text{с}$
- CL- скорость жидкости, $\text{м}/\text{с}$
- CGB-концентрация газа в пузырьке, $\text{кг}/\text{м}^3$
- CG-концентрация газа в жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$
- LG- длина горла трубки Вентури, м
- GVB- массовый расход пузырей, $\text{кг}/\text{с}$
- GCR- критический расход воды, $\text{кг}/\text{с}$
- IGB- интенсивность образования пузырей крит. размера, $1/(\text{м}^3 \text{ с})$
- NBS- поток пузырей, $1/\text{с}$
- JG- плотность потока газа, $\text{кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$
- MU – коэффициент расхода трубки вентури, -
- PL- статическое давление в канале, Па
- PLG- статическое давление в горле, Па
- PB- давление в пузырьке, Па
- RBR- радиус пузырька найденный из уравнения Релея, м
- Z- длина канала, м
- ZW- прочность воды, Па
- SIG- коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м
- SQ- удельная теплота парообразования, Дж/кг
- TL- температура жидкости, К
- VISL- коэффициент абсолютной вязкости жидкости, Па·с
- WBCR- работа образования пузырька критического размера, Дж
- PI- число “пи”
- AMV- молекулярная масса пара, μ_r , $\text{кг}/\text{кмоль}$
- UGC-универсальная газовая постоянная, $8314 \text{ Дж}/(\text{кмоль К})$

КК- интервал для выдачи результатов расчета (через каждые КК шагов)

```

    DIMENSION B(10),C(10)
    REAL IGB,NBS,NBS0,LAMLS,NV,NB,JG,LG,MU
    SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
    OPEN (2,FILE='V23.DAT')
    OPEN (8,FILE='REZV23.DAT')
    READ(2,*)
N,DX,Z,CB0,NBS0,TL0,PL0,DBCR,DPCR, &
BN,DN0,ZNC,ZND,UGC,AMV,PI,A1,
&
LAMLS,ROL0,VIS0,PS,SIG0,PSI,ST1,ST2,CG0,CGB0,PLG,PLSR,
КК
    Z=ZNC+ZND
    N=8
    NP=0
    FN0=PI*DN0**2/4.
    DG=2.97E-3
    FG=PI*DG**2/4.
    MU=0.954
    PLGD=0.04E5
    GCRD=FG*MU*(2.*ROL0*(PL0-PLGD))/(1.-
(DG/DN0)**4)**0.5
    GCR=FG*MU*(2.*ROL0*(PL0-PS))/(1.-(DG/DN0)**4)**0.5
    DGOTN=(GCRD-GCR)*100/GCRD
C    В опытах действительный расход воды составил 0,226 кг/с.
    CL0=4.*GCR/(PI*DN0**2*ROL0)
    PL=PL0
    TL=TL0
    CB=CB0
    GVB0=0
    CL=CL0
    GVB=GVB0
    DB=DBCRCR
    RBCR=DBCRCR/2.
    U0=0.01
    U=U0
    ROVB0=(PL+4.*SIG0/DBCRCR)*AMV/UGC/TL0
    ROVB=ROVB0
    RG=8314./29.
    GVB=0.
    CG=CG0

```

```

CGB=CGB0
IS=0
B(1)=CL
B(2)=TL
B(3)=CG
B(4)=DB
B(5)=GVB
B(6)=CB
B(7)=U
B(8)=RBR
PN=101323.
TN=273.
K=0
X=0
  120      X=X+DX
K=K+1
IF(X.GT.Z)GOTO 16
DO 110 LL=1,4
ROSGR=ROL0*(1.-PI*2.**0.5/6.)
DIF=0.216E-4*(TL0/TN)**1.8*PN/PL
BETA=2.*DIF/DB
JG=BETA*(CG-CGB)
GL=GCR-GVB
DPL=PS-PL
FN=GVB/(ROVB*CB)+GL/(ROL0*CL)
DN=(4.*FN/PI)**0.5
IF(X.LT.ZNC)PL=PL0/((PL0/PLG-1.)*(X/ZNC)**ST1+1.)
IF(X.LT.ZNC)PRPL=-2.*PL0*(PL0/PLG-1.)*X/
& (((PL0/PLG-1.)*(X/ZNC)**ST1+1.)**2*ZNC**2)
IF(X.GT.ZNC.AND.X.LE.Z)PL=PLSR/
& ((PLSR/PLG-1.)*(1.-(X-ZNC)/ZND)**ST2+1.)
IF(X.GT.ZNC.AND.X.LE.Z)PRPL=2.*PLSR*(PLSR/PLG-
1.)*(1.-(X-ZNC))/ & (((PLSR/PLG-1.)*(1.-(X-
ZNC)/ZND)**ST2+1.)**2*ZND)
DB=DBCR
PB=PL+4.*SIG0/DB
ROVB=PB*AMV/UGC/TL0
SQ=SQV(TL)
WBCR=16.*PI*(SIG0**3)/DPCR**2/3.
GIBSN=WBCR/TL0/BN
IGB=EXP(A1-PSI*GIBSN)
LG=2.E-3

```

NBS=IGB*FG*LG
 GVBCR=NBS*PI*DBCR**3*ROVB0/6.
 GVB=GVBCR
 NP=1
 NP1=1
 NB=6.*GVBCR/(PI*DBCR**3*ROVB0)
 NV=NB/FN/CL
 130 XV=GVB/GCR
 ROSM=ROVB*ROL0/(ROVB+(ROL0-ROVB)*XV)
 ROSMD=((GVB+GL)*ROVB*ROL0)/(GVB*ROL0+GL*ROVB)
 CSMD=GCR/ROSM/FN
 REN=CL*DN*ROSM/VIS0
 CF=0.0791/(REN**0.25)
 TW=CF*ROSM*CL**2/2.
 GL=GCR-GVB
 FV=PI*DB**3*NB/CL/6.
 FL=FN-FV
 CPL=4.2E3
 GSM=PI*DB**3*ROVB*NB+CL*FL*ROL0
 VB=PI*DB**3/6.
 A2=ROVB*VB*CB+0.5*ROL0*VB*(CB+CL*GVB/GL)
 B2=1.+0.5*ROL0*CL*FN/GL
 C2=0.5*ROL0*VB*CL/GL
 RB=DB/2.
 PB=PL+4.*SIG0/DB
 B3=35.
 CAP=B3/(PB**.56)
 REB=ABS(CL-CB)*DB*ROL0/VIS0
 IF(REB.GT.0.AND.REB.LE.1.)CX=24./REB
 IF(REB.GT.1.AND.REB.LE.390.)CX=24./(REB**.667)
 IF(REB.GT.390.)CX=.45
 PN=101323.
 TN=273.
 ALFA=2.*LAMLS/DB
 BETA=2.*DIF/DB
 CGB=CG-JG/BETA
 TB=TL-0.1
 C(1)=-((GVB*C(6)+TW*PI*DN+FN*PRPL+(CB-CL)*C(5))/GL
 C(2)=-((ALFA*PI*DB**2*NV*FN*(TL-
 TB)+SQ*C(5))/(CPL*GL)

```

C(3)=-((DIF*(CG-CGB)*PI*DB**2*NV*FN/RB)/((FN-
FV)*CL) if (ROVB.GT.0) then
SQ=SQV(TL)
C      C(4)=4.*(DIF*(CG-CGB)/ROVB+LAMLS*(TL-TB)/
C      & (SQ*ROVB))/CB/DB*NP1
      C(4)=4.*(DIF*(CG-
CGB)/ROVB+LAMLS*(TL-TB)/ &
(SQ*ROVB))/CB/DB*NP1+2.*U
      else
      c(4)=0
      endif
      C(5)=PI*DB**2*ROVB*NB*C(4)*NP1
      IF(NP.EQ.0)C(6)=-FN*PRPL/GL-
      TW*PI*DN/GL
      IF(NP1.EQ.1)C(6)=(-VB*B2*PRPL-
PI*DB**2*CX*ROL0*ABS(CB-CL)* & (CB-CL)-
C2*(4.*TW*FN/DN+(CB-CL)*C(5)))/A2
      IF(NP.EQ.0)C(1)=-FN*PRPL/GL-TW*PI*DN/GL
      IF(NP1.EQ.1)C(1)=-((GVB*C(6)+TW*PI*DN+FN*PRPL+(CB-
CL)*C(5))/GL
      IF(DPL.EQ.DPCR.OR.DPL.GT.DPCR) RBR=RBCR
      IF (N.EQ.8) THEN
      IF(DPL.GT.DPCR) C(7)=(DPL-2.*SIG0/RBR-
4.*VIS0*CB*U/RBR)/ & (RBR*ROL0*CB**2)-
3.*U**2/RBR/2.-C(6)*U/CB
      IF(DPL.GT.DPCR) C(8)=U
      ENDIF
110  CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
      CL= B(1)
      TL= B(2)
      CG= B(3)
      DB= B(4)
      GVB=B(5)
      CB= B(6)
      U=B(7)
      RBR=B(8)
      IF (RBR.LT.0) THEN
      RBR=0
      N=6
      ENDIF
      IF (DB.LT.0) DB=1.E-8 C
print*,x,n,rbr

```


C Определение прочности воды ZW

P=2350. C

A=10E38 C J=10E9 C

BL=A/J

BL=10E29

ZW=P-((16.*PI*SIG0**3)/(3.*BN*TL0*ALOG(BL)))**0.5

IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X,' PL=',PL,' CL=',CL,'

GVB=',GVB,

& ' ROSM=',ROSM,' DPL=',DPL,' DN=',DN,' DB=',DB,' U=',U,

& ' NB=',NB,' NV=',NV,' GCR=',GCR,' GL=',GL,' FV=',FV,'

FL=',FL,

& ' GSM=',GSM,' ZW=',ZW,' CB=',CB,' CG=',CG,' TL=',TL,'

BETA=',& BETA,' XV=',XV,' GCR=',GCR,' GCRD=',GCRD,'

DGOTN=',DGOTN,

& ' CGB=',CGB,' IGB=',IGB,' NBS=',NBS,' ROSMD=',ROSMD,'

RBR='

& ,RBR,' CSMD=',CSMD,' ROSGR=',ROSGR,' ROVB=',ROVB,'

PB=',PB

IF(K.EQ.KK.AND.DPL.GE.DPCR)WRITE(8,*) '

ROVB=',ROVB,

& ' GVB=',GVB,' XV=',XV,' NBS=',NBS,' DB=',DB,'

ROSGR=',ROSGR

IF(K.EQ.KK) K=0.0

IF(X.LT.Z) GOTO 120 16

STOP

END

SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)

DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)

IS=IS+1

GOTO(10,30,60,80),IS 10

E=A

DO 20 I=1,N

F(I)=B(I)

G(4*I-3)=C(I)*DX

20 B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.

GOTO 50

30 DO 40 I=1,N

G(4*I-2)=C(I)*DX

40 B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.

50 A=E+DX/2.

GOTO 100

60 DO 70 I=1,N

```

      G(4*I-1)=C(I)*DX 70
B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80     DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1)) 90
B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0 100
RETURN
      END

```

Файл исходных данных V23.DAT

```

8 0.1E-5 0.145 0.3 0.0 293. 6.E5 0.1E-4 400.3
1.38E-23 3.E-2 4.E-2 0.105 8314. 18. 3.141 91. 0.6 998.2
1004E-6 2350. 7.35E-2 5.31E-12 4. 4. 0.03 0.015.
01E5 0.8E5 100

```

```

N DX Z CB0 NBS0 TL0 PL0 DBCR DPCR
BN DN0 ZNC ZND UGC AMV PI A1 LAMLS ROL0
VIS0 PS(TL0) SIG0 PSI ST1 ST2 CG0 CGB0
PLG PLSR KK

```

PROGRAM VAP7_INJ

```

C Расчет инжектора, работающего на паре.
C Программа состоит из трех частей:
C расчет сопла-GOMMOD2 (обратная задача), камеры смешения-
C CONJT4 (прямая задача) и диффузора (скачка конденсации)-
C SCOND1PI.
C PROGRAM GOMMOD2
C Изоэнтропийное расширение гомогенного
C потока в сопле Лавалия - обратная задача
C ( задано распределение давления вдоль сопла и начальная
C степень сухости-XV0, которая может изменяться от 0.05 до 1).
DIMENSION B(10),C(10)
REAL M,MD,ISM0,IV,ISM,ISM0
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3

```

```

CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
SL(A)=(0.087725+0.0131875*(A-273.)-9.9375E-6*(A-
273.)**2)*1.E3
SP(A)=(8.764128-0.0165849*(A-273.)+2.49062E-5*(A-
273.)**2)*1.E3
PRV(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAMV(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
PVW(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A-
& 11.48776*ALOG(A))
OPEN (2,FILE='GM2.DAT')
OPEN (6,FILE='CON')
OPEN (7,FILE='fl.vap')
OPEN (8,FILE='REZGM2.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,CWV0,P0,
& XV0,D0,PSR,PI,DD,FIN,KK
N=5
F0=PI*D0**2/4.
T0=5.677*P0**0.25+273.
ROV0=1.213E-5*P0**0.9375
ROW0=RO(T0)
VW0=1./ROW0
VV0=1./ROV0
V0=(1.-XV0)*VW0+XV0*VV0
GS=F0*CWV0/V0
SW0=SL(T0)
SV0=SP(T0)
S0=(1.-XV0)*SW0+XV0*SV0
T=T0
CWV=CWV0
V=V0
P=P0
F=F0
D=D0
IS=0
B(1)=P
B(2)=F
B(3)=CWV
B(4)=V
B(5)=T
K=0
X=0

```

```

120  X=X+DX
      A=X
      K=K+1
      WRITE(6,*) X=',X,' CWV=',CWV,' T=',T,' D=',D,
& ' P=',P,' S0=',S0
      DO 110 LL=1,4
      TD=5.677*P**0.25+273.
      ROV=1.213E-5*P**0.9375
      ROW=RO(T)
      VV=1./ROV
      VW=1./ROW
      SW=SL(T)
      SV=SP(T)
      SW0=SL(T0)
      SV0=SP(T0)
      S0=(1.-XV0)*SW0+XV0*SV0
      XV=(S0-SW)/(SV-SW)
      V=(1.-XV)*VW+XV*VV
      CV=(1.-XV)*CVL(T)+XV*CVV(T)
      R=SQV(T)
      SA=((V*R)/(VV-VW))**2/CV/T)**0.5
      CD=CWV
      CWVD=CWV*FIN
      CDD=CWVD
      MD=CWVD/SA
      M=CWV/SA
      GD=GS*(1.-XV)
      GV=GS*XV
      SN=6.*GD/(PI*DD**3*ROW)
      PV=P0/((P0/PSR-1.)*(A/Z)**2+1.)
      C(1)=-2.*P0*(P0/PSR-1.)*A/(Z**2*((P0/PSR-
1.)*(A/Z)**2+1.))**2)
      C(2)=-((M**2-1.)*V*F*C(1)/CWV/CWV)
      C(3)=CWV*C(2)/F/(M**2-1.)
      C(4)=M**2*V*C(2)/F/(M**2-1.)
      C(5)=-T*(VV-VW)*CWV**2*C(2)/(M**2-1.)/R/V/F
110  CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      P=B(1)
      F=B(2)
      CWV=B(3)
      V=B(4)
      T=B(5)

```

```

ISM0=(1.-XV0)*YIL(T0)+XV0*IV(T0)+CWV0**2/2.
ISM=(1.-XV)*YIL(T)+XV*IV(T)
CWVI=(2.*(ISM0-ISM))**0.5
CWVID=FIN*CWVI
ISMD=ISM0-(ISM0-ISM)*FIN**2
XVD=XV+(ISMD-ISM)/R
GVD=XVD*GS
GDD=(1.-XVD)*GS
SND=6.*GDD/(PI*DD**3*ROW)
VD=(1.-XVD)*VW+XVD*VV
FD=GS*VD/CWVID
DND=(4.*FD/PI)**0.5
CVD=CWVD
DN=(4.*F/PI)**0.5
write(7,*)X,PV,DN,T,CVD,CDD,CWVID
IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X,' P=',P,' CWV=',CWV,' SA=',SA,
& ' GS=',GS,' V=',V,' M=',M,' T=',T,' DN=',DN,' XV=',XV,' PV='
& ,PV,' GD=',GD,' FIN=',FIN,' DD=',DD,' CVD=',CVD,' GV=',GV,
& ' SN=',SN,' CD=',CD,' XVD=',XVD,' CWVID=',CWVID,'
VD=',VD,
& ' DND=',DND,' GVD=',GVD,' GDD=',GDD,' SND=',SND,'
CDD=',CDD
IF(K.EQ.KK) K=0.0
IF(X.LT.Z) GOTO 120
OPEN(3,FILE='CJ4A.DAT')
WRITE(3,*) P,GVD,CVD,GDD,CDD,TD,DD,GS
16 STOP
END

```

PROGRAM CONJT4

```

C   Коническая камера смешения инжектора-
C   прямая задача.
DIMENSION B(15),C(15)
REAL ISM0,IVTD3,IVTV,IDST3,IDST30,
& LAMV,LAM,IV,JVC,JVI2,JVI3,NV2,NV3
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6

```

```

SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
OPEN (2,FILE='CJ4.DAT')
OPEN (3,FILE='CJ4A.DAT')
OPEN (4,FILE='PRN')
OPEN (6,FILE='CON')
OPEN (7,FILE='f2.vap')
OPEN (8,FILE='REZCJ4.DAT')
READ(2,*) N,DX,Z,G30,CD30,
& TD30,DD30,UGC,AMV,PI,KK,B3,DSMM
READ(3,*) PV0,G10,CV0,G20,CD20,TD20,DD20,GS0
N=11
XV0=G10/GS0
GSM0=G10+G20+G30
XVSM0=G10/GSM0
ROV0=1.213E-5*PV0**0.9375
ROD20=RO(TD20)
ROD30=RO(TD30)
FSM0=G10/ROV0/CV0+G20/ROD20/CD20+G30/ROD30/CD30
DSM0=(4.*FSM0/PI)**0.5
CSM0=((G10*CV0**2+G20*CD20**2+G30*CD30**2)/GSM0)**0.5
CP30=CPL(TD30)
YITD30=YILTL(TD30)
TV0=5.677*PV0**0.25+273.
ISM0=(IV(TV0)+CV0**2/2.)*G10+(YILTL(TD20)+CD20**2/2.)*
& G20+(YITD30+CD30**2/2.)*G30
IDST30=YITD30+CD30**2/2.
IDST3=IDST30
G2=G20
G3=G30
CV=CV0
CD2=CD20
CD3=CD30
DD2=DD20
DD3=DD30
TD2=TD20
TD3=TD30
GSM=GSM0
PV=PV0
IS=0
B(1)=PV

```

```

B(2)=G2
B(3)=DD2
B(4)=CD2
B(5)=G3
B(6)=DD3
B(7)=CD3
B(8)=CV
B(9)=IDST3
B(10)=TD3
B(11)=TD2
K=0
X=0
120  X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      DSM=DSM0-(DSM0-DSMM)*X/Z
      FSM=PI*DSM**2/4.
      PRFSM=-PI*(DSM0-(DSM0-DSMM)*X/Z)*(DSM0-DSMM)/2./Z
      TV=5.677*PV**0.25+273.
      ROV=1.213E-5*PV**0.9375
      ROD2=RO(TD2)
      ROD3=RO(TD3)
      G1=GSM0-G2-G3
      XVSM=G1/GSM0
      CSM=((G1*CV**2+G2*CD2**2+G3*CD3**2)/GSM0)**0.5
      FISM=CSM/CSM0
      IVTV=IV(TV)
      IVTD3=IV(TD3)
      CP2=CPL(TD2)
      CP3=CPL(TD3)
      YITD3=YILTL(TD3)
      VISV=VIS(TV)
      RED2=ABS(CV-CD2)*DD2*ROV/VISV
      IF(RED2.GT.0.AND.RED2.LE.1.) CX2=24./RED2
      IF(RED2.GT.1.AND.RED2.LE.390.) CX2=24./(RED2**0.667)
      IF(RED2.GT.390.) CX2=0.45
      DSTA2=CX2*PI*DD2**2*ROV*(CV-CD2)*ABS(CV-CD2)/8.
      RED3=ABS(CV-CD3)*DD3*ROV/VISV
      IF(RED3.GT.0.AND.RED3.LE.1.) CX3=24./RED3
      IF(RED3.GT.1.AND.RED3.LE.390.) CX3=24./(RED3**0.667)
      IF(RED3.GT.390.) CX3=0.45
      DSTA3=CX3*PI*DD3**2*ROV*(CV-CD3)*ABS(CV-CD3)/8.

```

$REV=CV*DSM*ROV/VISV$
 $CF=0.079/(REV**0.25)$
 $TW=CF*ROV*CV**2/2.$
 $PRV=PR(TV)$
 $LAMV=LAM(TV)$
 $ALFA2=(2.+0.6*RED2**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD2$
 $ALFA3=(2.+0.6*RED3**0.5*PRV**0.33)*LAMV/DD3$
 $PVTD2=((TD2-273.)/5.677)**4$
 $PVTD3=((TD3-273.)/5.677)**4$
 $CAPI2=B3/(PVTD2**0.56)$
 $CAPI3=B3/(PVTD3**0.56)$
 $CAPC=B3/(PV**0.56)$
 $GCV=UGC/AMV$
 $JVI2=PVTD2*CAPI2/(2.*GCV*PI*TD2)**0.5$
 $JVI3=PVTD3*CAPI3/(2.*GCV*PI*TD3)**0.5$
 $JVC=PV*CAPC/(2.*GCV*PI*TV)**0.5$
 $RJV2=JVI2-JVC$
 $RJV3=JVC-JVI3$
 $ROSM=ROV+G3*(1.-ROV/ROD3)/FSM/CD3+G2*(1.-ROV/ROD2)/FSM/CD2$
 $ROSGR=(1.-PI*2.**0.5/6.)*(ROD2*G2+ROD3*G3)/(G2+G3)$
 $FV=G1/CV/ROV$
 $NV2=6.*G2/(PI*DD2**3*ROD2*CD2*FSM)$
 $NV3=6.*G3/(PI*DD3**3*ROD3*CD3*FSM)$
 $PPROV=8.805129E4*PV**62.5E-3$
 $C(1)=CV/(CV**2/PPROV-(G2/G1)*(CV/CD2)**3$
 $\& *(ROV/ROD2)**2-$
 $\& (G3/G1)*(CV/CD3)**3*(ROV/ROD3)**2-1.)/FV*(-$
 $FSM*(DSTA2*NV2*(CV**2*ROV/(CD2**2*ROD2)-$
 $1.)\&+DSTA3*NV3*(CV**2*ROV/(CD3**2*$
 $\& ROD3)-1.))/CV-PI*FSM*((CV*ROV/(CD2*ROD2)-(CV-$
 $CD2)/CV-1.)*$
 $\& DD2**2*NV2*RJV2+(CV*ROV*(CV-CD3)/(CD3**2*ROD3)-$
 $CV*ROV/$
 $\& (CD3*ROD3)+1.)*DD3**2*NV3*RJV3)-$
 $CV*ROV*PRFSM+TW*PI*DSM/CV)$
 $C(2)=-6.*RJV2*G2/CD2/ROD2/DD2$
 $C(3)=-2.*RJV2/ROD2/CD2$
 $C(4)=-C(1)/ROD2/CD2+6.*DSTA2/PI/(DD2**3)/ROD2/CD2$
 $C(5)=6.*RJV3*G3/CD3/ROD3/DD3$
 $C(6)=2.*RJV3/ROD3/CD3$
 $C(7)=-C(1)/ROD3/CD3+6.*DSTA3/PI/(DD3**3)/ROD3/CD3$


```

& +(CV-CD3)*C(5)/G3
C(8)=(-FSM*C(1)-TW*PI*DSM-G2*C(4)-G3*C(7)+(CV-
CD2)*C(2)
& +(CV-CD3)*C(5))/G1
C(9)=((IVTV+CV**2/2.-YITD3-CD3**2/2.)*JVC-
& (IVTD3-YITD3)*JVI3+ALFA3*(TV-TD3))*
& 6./CD3/ROD3/DD3
C(10)=C(9)/CP3-CD3*C(7)/CP3
C(11)=- (6.*ALFA2*(TD2-TV)+RJV2*SQV(TD2))/CP2/ROD2/
& DD2/CD2
CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
PV=B(1)
G2=B(2)
DD2=B(3)
CD2=B(4)
G3=B(5)
DD3=B(6)
CD3=B(7)
CV=B(8)
IDST3=B(9)
TD3=B(10)
110 TD2=B(11)
TDSM=(G3*TD3+G2*TD2)/(G3+G2)
WRITE(7,*)X,PV,DSM,TD2,TD3,CV,CD2,CD3
PRINT*, ' X=',X,' PV=',PV,' G1=',G1,
& ' G2=',G2,' G3=',G3,' CV=',CV,' CD2=',CD2,
& ' CD3=',CD3,' DD2=',DD2,' DD3=',DD3,' TD2=',
& TD2,' TD3=',TD3,' GSM=',GSM,' DSM=',DSM,' FISM=',FISM
IF(K.EQ.KK) WRITE(6,*) ' X=',X,' PV=',PV,' G1=',G1,
& ' G2=',G2,' G3=',G3,' CV=',CV,' CD2=',CD2,
& ' CD3=',CD3,' DD2=',DD2,' DD3=',DD3,' TD2=',
& TD2,' TD3=',TD3,' GSM=',GSM,' DSM=',DSM,' FISM=',FISM,
& ' ROSM=',ROSM,' ROSGR=',ROSGR
IF(K.EQ.KK) WRITE(8,*) ' X=',X,' PV=',PV,' G1=',G1,
& ' G2=',G2,' G3=',G3,' CV=',CV,' CD2=',CD2,' CSM=',CSM,
& ' CD3=',CD3,' DD2=',DD2,' DD3=',DD3,' TD2=',TD2,
& ' TD3=',TD3,' TV=',TV,' GSM=',GSM,' DSM=',DSM,
& ' FISM=',FISM,' ROSM=',ROSM,' ROSGR=',ROSGR,
& ' TDSM=',TDSM

IF(K.EQ.KK) K=0
IF(X.LT.Z) GOTO 120

```

```

OPEN(5,FILE='CJ4B.DAT')
WRITE(5,*) PV,CSM,GSM,DSM,FISM,CD30,G30,TDSM,ROSM
STOP
END

```

PROGRAM SCOND1PI

```

DIMENSION B(10),C(10)
REAL JAC,LAMLS,IMP0,IMP
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.))+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.))+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.))+0.59823E-2*(A-273.)**2
VI(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/A
& -11.48776*ALOG(A))
OPEN(2,FILE='SC1PI.DAT')
OPEN(5,FILE='CJ4B.DAT')
OPEN(6,FILE='CON')
OPEN(7,FILE='f3.vap')
OPEN(8,FILE='REZSC1PI.DAT')
READ(2,*) N,DX,DB0,DCSR,
& ZCC,ZCM,ZCD,UGC,AMV,PI,B1,B2,
& LAMLS,KK
READ(5,*) P0,CSM0,GSM0,DC0,FISM,CD30,G30,TL0,ROSM0
N=2
Z=ZCC+ZCM+ZCD
write(7,*) ZCD
DCM=DC0
FC0=PI*DC0**2/4.
ROL0=RO(TL0)
ROSGR=ROL0*(1.-PI*2.**0.5/6.)
SIGL0=SIG(TL0)
PB0=P0+4.*SIGL0/DB0
TVB0=5.6322*P0**0.25+273.
ROVB0=1.213E-5*((TVB0-273.)/5.6322)**3.75
XV0=(ROL0-ROSM0)*ROVB0/((ROL0-ROVB0)*ROSM0)
IMP0=GSM0*CSM0+FC0*P0
SB=6.*GSM0*XV0/PI/(DB0**3)/ROVB0
GVB0=XV0*GSM0
GL0=GSM0-GVB0

```

```

      STAI0=GVB0*(VI(TVB0)+CSM0**2/2.)+GL0*(YIL(TL0)+
& CSM0**2/2.)
      PRINT*,'GVB0=',GVB0,'GL0=',GL0,'VI(TVB0)=',VI(TVB0),
& 'CSM0=',CSM0,'YIL(TL0)=',YIL(TL0),' TL0=',TL0
      P=P0
      ROL=ROL0
      TL=TL0
      DB=DB0
      CSM=CSM0
      GSM=GSM0
      ROSM=ROSM0
      GVB=GVB0
      XV=XV0
      FC=FC0
      IMP=IMP0
      GCV=UGC/AMV
      IS=0
      B(1)=DB
      B(2)=IMP
      K=0
      X=0
120   X=X+DX
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      SIGL=SIG(TL)
      VISL=VIS(TL)
      ROL=RO(TL)
      IF(DB.GT.1.E-10) THEN
      PB=P+4.*SIGL/DB
      CAP=B2/(PB**0.56)
      ROVB=1.213E-5*PB**0.9375
      TVB=5.6322*P**0.25+273.
      GVB=SB*PI*DB**3*ROVB/6.
      XV=GVB/GSM
      ELSE
      GVB=0.
      SB=0.
      FV=0.
      ROSM=ROL
      DB=0.
      C(1)=0.
      ENDIF

```

```

ROSM=ROVB*ROL/(ROVB+GVB*(ROL-ROVB)/GSM)
IF(X.LT.ZCC) DC=DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC
IF(X.GT.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) DC=DCM
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) DC=DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD
FC=PI*DC**2/4.
FV=GVB/ROVB/CSM
FL=FC-FV
IF(X.LT.ZCC) PRFC=-PI*(DC0-(DC0-DCM)*X/ZCC)*(DC0-
DCM)/2./ZCC
IF(X.GE.ZCC.AND.X.LE.(ZCC+ZCM)) PRFC=0.0
IF(X.GT.(ZCC+ZCM)) PRFC=PI*(DCM+(DCSR-DCM)*(X-
(ZCC+ZCM))/ZCD)* (DCSR-DCM)/(2.*ZCD)
DT=TVB-TL
SQ=SQV(TVB)
CPLIT=CPL(TL)
CSM=GSM/ROSM/FC
REC=CSM*DC*ROSM/VISL
CF=0.0791/(REC**0.25)
TW=CF*ROSM*CSM**2/2.
ALS=LAMLS/CPLIT/ROL
JAC=CPLIT*DT*ROL/SQ/ROVB
GL=GSM-GVB
TL=((STAI0-(VI(TVB)+CSM**2/2.)*GVB)/GL-
CSM**2/2.)/CPLIT+273.
RJDL=CAP*(PB/(TVB**0.5)-PS(TL)/(TL**0.5))/
((2.*PI*GCV)**0.5)
Y=(TL-273.)/100.
AV=(1.25*PB/ROVB)**0.5+13.36363636-0.03636363636*(TVB-
273.)
AL=1429.00787+595.633911*Y-749.205444*Y**2+394.216553*
& Y**3-109.585632*Y**4+11.354808*Y**5
ALFA=(ROL-ROVB*ROL/(ROVB+XV*(ROL-ROVB)))/(ROL-
ROVB)
ASM=1./(((ALFA*ROVB+(1.-ALFA)*ROL)*(ALFA/
(ROVB*AV**2)+
& (1.-ALFA)/(ROL*AL**2))))**0.5)
DALFDP=ALFA*(1.-ALFA)*(1./(ROL*AL**2)-
1./(ROVB*AV**2))
ASM1=1./(((ROVB-ROL)*DALFDP+ALFA/(AV**2)+(1.-ALFA)/
& (AL**2))**0.5)
CRM=CSM/ASM

```

```

      OPR=CSM**2/(ASM**2)-1.
C     C(1)=8.*LAMLS*CPLIT*RO(TVB)*DT*ABS(DT)*B1/
C     & (SQ**2*ROVB**2*DB*CSM)
      C(1)=-2.*RJD/ROVB/CSM
      IF(DB.LT.4.6E-6) C(1)=0.
      C(2)=P*PRFC-TW*PI*DC
      CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
      DB=B(1)
110   IMP=B(2)
      CSM=GSM/FC/ROSM
      P=(IMP-GSM*CSM)/FC
      PSTA=P+ROSM*CSM**2/2.
      WRITE(7,*)X,P,DC,TL,TVB,CSM
      PRINT*, ' X=',X, ' P=',P, ' CSM=',CSM, ' GVB=',GVB, ' CRM=',CRM
      IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X, ' P=',P, ' CSM=',CSM,
GVB=',GVB,
& ' TL=',TL, ' ROSM=',ROSM, ' DT=',DT, ' DC=',DC, ' DB=',DB,
& ' TVB=',TVB, ' XV=',XV, ' SB=',SB, ' OPR=',OPR,
STAI0=',STAI0,
& ' AV=',AV, ' AL=',AL, ' ALFA=',ALFA, ' ASM=',ASM,
ASM1=',ASM1,
& ' CRM=',CRM, ' IMP=',IMP, ' RJD=',RJD, ' PS(TL)=',PS(TL),
& ' PSTA=',PSTA
      IF(K.EQ.KK) K=0.0
      IF(X.LT.Z) GOTO 120
      IF(XV.LE.8.E-12.OR.OPR.GE.ABS(0.999)) GOTO 16
      IF(GVB.LE.5.7E-12.OR.DB.LE.1.1E-7) GOTO 16
16   STOP
      END
      Файл GM2.DAT
      5  0.3E-3  0.15  30.  2.E5    1.    3.E-2  0.4E5  3.1416
      30.E-6  0.96  10
      N  DX    Z  CWV0 P0    XV0    D0    PSR    PI
      DD  FIN  KK

      Файл CJ4.DAT
      11 0.1E-3  0.03  0.3  10.
      283.  8.E-5  8314.  18.  3.1416  2  38.  4.8E-3
      N  DX    Z  G30  CD30
      TD30 DD30 UGC AMV PI  KK  B3  DSMM

      Файл SC1PI.DAT

```

```

2 0.1E-3 8.E-5 10.E-3 0.0 10.E-3 0.05 8314. 18. 3.1416
0.01 1.
0.68 2
N DX DB0 DCSR ZCC ZCM ZCD UGC AMV PI
B1 B2
LAMLS KK

```

PROGRAM BETA

```

C Программа позволяет определить значение
C  $BETA_{кр} = F(G1/G2)$ , где G1-расход горячей воды;
C G2-расход сухого насыщенного пара (см. книгу
C " Вскипающие адиабатные потоки" Зысин В.А. и др.
C Атомиздат, М.:1976,с.17 и
C " Сборник задач и упражнений по газовой динамике"
C К. Осватич и Р. Шварценбергер."Мир".М.:1967,с.61);
C  $GOT1 = G1/G2$ .
REAL K2,MU,M2
OPEN(2,FILE='BETA.DAT')
OPEN(4,FILE='PRN')
OPEN(6,FILE='CON')
OPEN(8,FILE='REZBET.DAT')
READ(2,*) P0,T0,R0,MU,K2,V01
T0K=T0+273.
V02=P0*MU/R0/T0K
BETKR=(2./(K2+1.))**(K2/(K2-1.))
DO 1 I=1,50
BT=BETKR-0.01*(I-1)
GOT1=(2.*BT**((2.-K2)/K2)-(K2+1.)*BT**(1./K2))*
& ((K2-1.)*V02/V01/(K2**3))*((1.-BT)/(BT**(2./K2)-
& BT**((K2+1.)/K2)))**3)**0.5
M2=((2./(K2-1.))*(1./(BT**((K2-1.)/K2))-1.))**0.5
PKR=BT*P0
WRITE(6,*) ' BT=',BT,' GOT1=',GOT1,' M2=',M2,' PKR=',PKR
WRITE(8,*) ' BT=',BT,' GOT1=',GOT1,' M2=',M2,' PKR=',PKR
1 CONTINUE
STOP
END
Файл исходных данных программы Beta
6.E5 158. 8314. 18. 1.135 1.10204E-3
P0 T0 R0 MU K2 V01
Результаты расчета

```

BT= 0.5774304 346458.2	GOT1= 5.3289408E-05	M2= 0.9999999	PKR=
BT= 0.5674304 340458.2	GOT1= 3.274961	M2= 1.016315	PKR=
BT= 0.5574304 334458.3	GOT1= 6.754396	M2= 1.032689	PKR=
BT= 0.5474305 328458.3	GOT1= 10.45386	M2= 1.049132	PKR=
BT= 0.5374304 322458.2	GOT1= 14.39032	M2= 1.065653	PKR=
BT= 0.5274304 316458.2	GOT1= 18.58238	M2= 1.082262	PKR=
BT= 0.5174304 310458.2	GOT1= 23.05048	M2= 1.098967	PKR=
BT= 0.5074304 304458.2	GOT1= 27.81724	M2= 1.115779	PKR=
BT= 0.4974304 298458.3	GOT1= 32.90724	M2= 1.132709	PKR=
BT= 0.4874304 292458.2	GOT1= 38.34774	M2= 1.149765	PKR=
BT= 0.4774304 286458.2	GOT1= 44.16896	M2= 1.166960	PKR=
BT= 0.4674304 280458.2	GOT1= 50.40425	M2= 1.184304	PKR=
BT= 0.4574304 274458.2	GOT1= 57.09097	M2= 1.201809	PKR=
BT= 0.4474304 268458.2	GOT1= 64.27000	M2= 1.219487	PKR=

PROGRAM ROCM

```

C   Программа позволяет определить максимальную плотность
C   тока и критические параметры при изоэнтропийном
C   расширении насыщенной воды при различных температурах.
  CVV(A)=135950.-799.5*(A-273.)+1.502*(A-273.)**2
  CP(A)=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)**2
  CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.)+1.314E-2*(A-273.)**2
  CPIT(A)=(4331.*(T0-A)-1.545*((T0-273.)**2-(A-273.)**2)+
& 0.66E-2*((T0-273.)**3-(A-273.)**3))/(T0-A)
  CT(A)=(2.*CPI*(T0-A-A*ALOG(T0/A)))**0.5
  ROL(A)=1008.7-0.288*(A-273.)-2.16E-3*(A-273.)**2
  R(A)=(2453.-1.36*(A-273.)-6.E-3*(A-273.)**2)*1.E3
  OPEN(2,FILE='ROCMAX.DAT')
```

```

OPEN(4,FILE='PRN')
OPEN(6,FILE='CON')
OPEN(8,FILE='REZ.DAT')
READ(2,*) POC
WRITE(8, 99)
WRITE(6, 99)
99  FORMAT (/T8,'P',T18,'ROC',T28,'T',T36,'X',T43,'C',T49,'A',
& T56,'MAX',T64,'BET')
ROCMAx=0.0
DO 2 J=1,15
C  t0=120C
T0=393+20*J
DO 1 I=1,100
T=T0-0.5*I
CPI=CPIT(T)
C=CT(T)
P0=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*T0-7821.541/T0
& -11.48776*ALOG(T0))
P=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*T-7821.541/T
& -11.48776*ALOG(T))
ROV=1.1203E-5*P**0.9435
VV=1./ROV
VL=1./ROL(T)
X=(CPI*T*ALOG(T0/T))/R(T)
ROSM=ROL(T)*ROV/(ROV+X*(ROL(T)-ROV))
VSM=1./ROSM
CVSM=(1.-X)*CVL(T)+X*CVV(T)
SA=VSM*R(T)/(VV-VL)/((CVSM*T)**0.5)
XAM=C/SA
ROC=C*ROSM
BET=P/P0
IF(ROC.LT.ROCMAx) GO TO 1
ROCMAx=ROC
PM=P
TM=T
XM=X
CM=C
SAM=SA
XAMM=XAM
WRITE(8,100) PM,ROCMAx,TM,XM,CM,SAM,XAMM,BET
WRITE(6,100) PM,ROCMAx,TM,XM,CM,SAM,XAMM,BET
100  FORMAT(T2,2E11.4,F8.3,F8.5,2F6.1,F8.5,E11.4)

```



```

1 CONTINUE
2 CONTINUE
STOP
END

```

Файл исходных данных PROGRAM ROCM

```

1.E5
POC

```

PROGRAM ROCS

```

C Программа позволяет определить максимальную плотность
C тока и критические параметры при изоэнтропийном
C расширении насыщенной воды. Используются подпрограммы
C SPLINE и SEVAL.

```

```

DIMENSION P(9),T(9),VL(9),VV(9),R(9),ENL(9),ENV(9),
& CPW(9),CVW(9),CVP(9),BT(9),CT(9),DT(9),BVL(9),
& CVL(9),DVL(9),BVV(9),CVV(9),DVV(9),BR(9),CR(9),
& DR(9),BENL(9),CENL(9),DENL(9),BENV(9),CENV(9),
& DENV(9),BCPW(9),CCPW(9),DCPW(9),BCVW(9),CCVW(9),
& DCVW(9),BCVP(9),CCVP(9),DCVP(9),BP(9),CP(9),DP(9),
& MUW(9),BMUW(9),CMUW(9),DMUW(9),MUP(9),BMUP(9),
& CMUP(9),DMUP(9),LAMP(9),BLAMP(9),CLAMP(9),DLAMP(9)

```

```

REAL MAX,MUW,MUP,LAMP,MUWS,MUPS,LAMPS

```

```

CT1(A)=(2.*CPI*(T0K-(A+273.)-(A+273.)*ALOG(T0K/
& (A+273.))))**0.5

```

```

OPEN(2,FILE='WATER.DAT')

```

```

OPEN(4,FILE='PRN')

```

```

OPEN(6,FILE='CON')

```

```

OPEN(8,FILE='REZRSP.DAT')

```

```

READ(2,*) P0,T0K,POC,GL

```

```

READ(2,*) (T(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (P(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (VL(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (VV(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (ENL(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (ENV(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (R(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (CVW(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (CVP(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (CPW(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (MUW(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (MUP(I),I=1,9)

```

```

READ(2,*) (LAMP(I),I=1,9)

```

```

WRITE(6,99)

```

```

WRITE(8,99)
99  FORMAT(/T8,'P',T18,'ROC',T28,'T',T36,'X',T44,'C',T51,'A',
& T57,'MAX',T67,'DN')
CALL SPLINE(9,P,T,BT,CT,DT)
CALL SPLINE(9,T,P,BP,CP,DP)
CALL SPLINE(9,T,VL,BVL,CVL,DVL)
CALL SPLINE(9,T,VV,BVV,CVV,DVV)
CALL SPLINE(9,T,ENL,BENL,CENL,DENL)
CALL SPLINE(9,T,ENV,BENV,CENV,DENV)
CALL SPLINE(9,T,R,BR,CR,DR)
CALL SPLINE(9,T,CVW,BCVW,CCVW,DCVW)
CALL SPLINE(9,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP)
CALL SPLINE(9,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW)
CALL SPLINE(9,T,MUW,BMUW,CMUW,DMUW)
CALL SPLINE(9,T,MUP,BMUP,CMUP,DMUP)
CALL SPLINE(9,T,LAMP,BLAMP,CLAMP,DLAMP)
T0=T0K-273.
DO 2 J=1,100
PS=P0-0.05E5*J
CALL SEVAL(9,PS,P,T,BT,CT,DT,TS,P1TS,P2TS)
CALL SEVAL(9,TS,T,VL,BVL,CVL,DVL,VLS,P1VLS,P2VLS)
CALL SEVAL(9,TS,T,VV,BVV,CVV,DVV,VVS,P1VVS,P2VVS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENL,BENL,CENL,DENL,ENLS,P1ENLS,P2ENLS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,ENV,BENV,CENV,DENV,ENVS,P1ENVS,P2ENVS)
CALL SEVAL(9,TS,T,R,BR,CR,DR,RS,P1RS,P2RS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVW,BCVW,CCVW,DCVW,CVWS,P1CVWS,P2CVW
S)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CVP,BCVP,CCVP,DCVP,CVPS,P1CVPS,P2CVPS)
CALL
SEVAL(9,T0,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CP0W,P1CP0W,P2CP0W)
CALL
SEVAL(9,TS,T,CPW,BCPW,CCPW,DCPW,CPSW,P1CPSW,P2CPSW)
CALL
SEVAL(9,TS,T,MUW,BMUW,CMUW,DMUW,MUWS,P1MUWS,P2M
UWS)
CALL
SEVAL(9,TS,T,MUP,BMUP,CMUP,DMUP,MUPS,P1MUPS,P2MUPS)

```

```

CALL
SEVAL(9,TS,T,LAMP,BLAMP,CLAMP,DLAMP,LAMPS,P1LAMPS,P
2LAMPS)
CPI=(CP0W+CPSW)/2.
C=CT1(TS)
ROV=1./VVS
X=(CPI*(TS+273.)*ALOG(T0K/(TS+273.)))/RS
ROL=1./VLS
ROSM=ROL*ROV/(ROV+X*(ROL-ROV))
VSM=1./ROSM
CVSM=(1.-X)*CVWS+X*CVPS
SA=VSM*RS/(VVS-VLS)/((CVSM*(TS+273.))**0.5)
MAX=C/SA
ROC=C*ROSM
FN=GL/ROC
DN=(4.*FN/3.1416)**0.5
IF(ROC.LT.ROCM) GOTO 4
ROCM=ROC
WRITE(6,100) PS,ROC,TS,X,C,SA,MAX,DN
WRITE(8,100) PS,ROC,TS,X,C,SA,MAX,DN
100  FORMAT(T2,2E11.4,F8.3,F8.5,2F7.2,F8.5,2X,E10.4)
2    CONTINUE
4    STOP
END
SUBROUTINE SPLINE(N,X,Y,B,C,D)
DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
NM1=N-1
IF(N.LT.2) RETURN
IF(N.LT.3) GO TO 50
D(1)=X(2)-X(1)
C(2)=(Y(2)-Y(1))/D(1)
DO 10 I=2,NM1
D(I)=X(I+1)-X(I)
B(I)=2.0*(D(I-1)+D(I))
C(I+1)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)
C(I)=C(I+1)-C(I)
10  CONTINUE
B(1)=-D(1)
B(N)=-D(N-1)
C(1)=0.0
C(N)=0.0
IF(N.EQ.3) GO TO 15

```

```

C(1)=C(3)/(X(4)-X(2))-C(2)/(X(3)-X(1))
C(N)=C(N-1)/(X(N)-X(N-2))-C(N-2)/(X(N-1)-X(N-3))
C(1)=C(1)*D(1)**2/(X(4)-X(1))
C(N)=-C(N)*D(N-1)**2/(X(N)-X(N-3))
15  DO 20 I=2,N
    T=D(I-1)/B(I-1)
    B(I)=B(I)-T*D(I-1)
    C(I)=C(I)-T*C(I-1)
20  CONTINUE
    C(N)=C(N)/B(N)
    DO 30 IB=1,NM1
    I=N-IB
    C(I)=(C(I)-D(I)*C(I+1))/B(I)
30  CONTINUE
    B(N)=(Y(N)-Y(NM1))/D(NM1)+D(NM1)*(C(NM1)+2.0*C(N))
    DO 40 I=1,NM1
    B(I)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)-D(I)*(C(I+1)+2.0*C(I))
    D(I)=(C(I+1)-C(I))/D(I)
    C(I)=3.0*C(I)
40  CONTINUE
    C(N)=3.0*C(N)
    D(N)=D(N-1)
    RETURN
50  B(1)=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))
    C(1)=0.0
    D(1)=0.0
    B(2)=B(1)
    C(2)=0.0
    D(2)=0.0
    RETURN
    END
    SUBROUTINE SEVAL(N,U,X,Y,B,C,D,S,SP,SPP)
    DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
    DATA I/1/
    IF(I.GE.N) I=1
    IF(U.LT.X(I)) GO TO 10
    IF(U.LE.X(I+1)) GO TO 30
10  I=1
    J=N+1
20  K=(I+J)/2
    IF(U.LT.X(K)) J=K
    IF(U.GE.X(K)) I=K

```

```

IF(J.GT.I+1) GO TO 20
30  DX=U-X(I)
    S=Y(I)+DX*(B(I)+DX*(C(I)+DX*D(I)))
    SP=B(I)+DX*(2.*C(I)+3.*DX*D(I))
    SPP=2.*C(I)+6.*DX*D(I)
    RETURN
    END
    Файл исходных данных  PROGRAM ROSP
6.E5 431.84 1.E5 0.4
100. 110. 120. 130. 140. 150. 160. 170. 180.
1.01E5 1.43E5 1.98E5 2.70E5 3.61E5 4.76E5 6.18E5 7.92E5 10.03E5
1.04E-3 1.05E-3 1.06E-3 1.07E-3 1.08E-3 1.09E-3 1.1E-3 1.11E-3
1.13E-3
1.673 1.21 0.8917 0.6683 0.5087 0.3926 0.3068 0.2426 0.1939
419.E3 461.E3 503.E3 546.E3 589.E3 632.E3 675.E3 719.E3 763.E3
2676.E3 2691.E3 2706.E3 2721.E3 2734.E3 2746.E3 2758.E3 2769.E3
2778.E3
2257.E3 2230.E3 2202.E3 2175.E3 2145.E3 2114.E3 2082.E3 2050.E3
2015.E3
4.22E3 4.23E3 4.24E3 4.26E3 4.28E3 4.3E3 4.33E3 4.35E3 4.38E3
71.02E3 65.91E3 61.3E3 57.11E3 53.3E3 49.82E3 46.63E3 43.66E3
40.94E3
4.22E3 4.23E3 4.25E3 4.27E3 4.29E3 4.31E3 4.35E3 4.38E3 4.417E3
.283E-3 .259E-3 .237E-3 .218E-3 .201E-3 .186E-3 .174E-3 .163E-3
.153E-3
12.E-6 12.5E-6 12.9E-6 13.2E-6 13.5E-6 13.9E-6 14.3E-6 14.7E-6
15.1E-6
2.4E-2 2.5E-2 2.6E-2 2.7E-2 2.8E-2 2.9E-2 3.E-2 3.13E-2 3.27E-2
    P0,T0K,POC,GL
    (T(I),I=1,9)
    (P(I),I=1,9)
    (VL(I),I=1,9)
    (VV(I),I=1,9)
    (ENL(I),I=1,9)
    (ENV(I),I=1,9)
    (R(I),I=1,9)
    (CVW(I),I=1,9)
    (CVP(I),I=1,9)
    (CPW(I),I=1,9)
    (MUW(I),I=1,9)
    (MUP(I),I=1,9)
    (LAMP(I),I=1,9)

```

Приложение №6**PROGRAM SEPARATOR**

```

C   Программа позволяет выполнить расчет
C   движения капли в сепараторе.
DIMENSION B(10),C(10)
REAL IVTV,ISM, LAMV,LAM,IV
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.))+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.))-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.))+1.98E-2*(A-273.)**2
VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.))+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.))+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.))-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.))+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.))+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
LAML(A)=0.57225+1.92E-3*(A-273.))-8.1E-6*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.))+1.314e-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950-799.5*(A-273.))+1.502*(A-273.)**2
ROP(A)=6.7962-0.129299*(A-273.))+6.7314e-4*(A-273.)**2
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/
& A-11.48776*ALOG(A))
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.))-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='SEP.DAT')
OPEN (8,FILE='REZSEP.DAT')
READ(2,*) N,DFIG,RV,RN,TV,TD,DD,CDR,CDU,CDZ,
& CVR,CVU0,CVZ,UGC,AMV,PI,KK
GCA=UGC/AMV
VD=PI*DD**3/6.
ROD=RO(TD)
GD=PI*DD**3*ROD/6.
N=3
IS=0
B(1)=CDR
B(2)=CDU
B(3)=CDZ
J=0
K=0
FIR=0
R=RV
WRITE(8,*)' R Z FIG CDR CDU CDZ C(1) C(2) C(3) RED CX
DC'
DFIR=DFIG*PI/180.

```

```

120  FIR=FIR+DFIR
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      ROD=RO(TD)
      ROV=ROP(TV)
      VISV=VISP(TV)
      PV=PS(TV)
      DR=CDR*R*DFIR/CDU
      R=R+DR
      RSR=(RN+RV)/2.
      CVU=CVU0*RSR/R
      DC=((CVR-CDR)**2+(CVU-CDU)**2+(CVZ-CDZ)**2)**0.5
      RED=DC*DD*ROV/VISV
      IF(RED.GT.0.AND.RED.LE.1.)CX=24./RED
      IF(RED.GT.1.AND.RED.LE.390.)CX=24./(RED**.667)
      IF(RED.GT.390.)CX=.45
      VD=PI*DD**3/6.
      C(1)=CDU-3.*CX*ROV*DC*R*CDR/4./ROD/DD/CDU
      C(2)=3.*CX*ROV*(CVU/CDU-1.)*DC*R/4./ROD/DD-CDR
      C(3)=3.*CX*ROV*(CVZ-CDZ)*DC*R/4./ROD/DD/CDU
      CALL RKM(FIR,DFIR,N,IS,B,C)
      CDR=B(1)
      CDU=B(2)
110  CDZ=B(3)
      DZ=ABS(CDZ/CDR*DR)
      Z=Z+DZ
      FIG=FIR*180./PI
      IF(K.EQ.KK) THEN
      PRINT *, "Z=",Z
      WRITE(8,200)
R,Z,FIG,CDR,CDU,CDZ,C(1),C(2),C(3),RED,CX,DC
      K=0
      J=J+1
      IF(J.EQ.10) THEN
      WRITE(8,*)'  R Z FIG CDR CDU CDZ C(1) C(2) C(3) RED CX
DC'
      J=0
          ENDIF
      END IF
      IF(R.LT.RN) GOTO 120
200  FORMAT(2F8.5,12E10.2)
      STOP

```

```

END
SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
IS=IS+1
GOTO(10,30,60,80),IS
10  E=A
    DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20  B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
    GOTO 50
30  DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40  B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50  A=E+DX/2.
    GOTO 100
60  DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70  B(I)=F(I)+G(4*I-1)
    A=E+DX
    GOTO 100
80  DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90  B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
    IS=0
100 RETURN
END

```

```

Файл исходных данных SEP.DAT
3 1. 0.1 0.2 473. 473. 8.E-5 0.0 20. 0.0
0.0 25. 15. 8314. 18. 3.1416 2

```

```

N DFIG RV RN TV TD DD CDR CDU CDZ
CVR CVU0 CVZ UGC AMV PI KK

```

Движение двухфазного потока в криволинейном канале

Приведенный ниже текст пакета программ позволяет выполнить расчет сопла с парогенерирующей решеткой, работающего на вскипающей воде (LAV_27B), межлопаточного канала гидропаровой турбины, мощность на среднем радиусе колеса,

лопаточный КПД (TURB_8D) и движение капель за рабочим колесом (DROPLET).

PROGRAM LAV27B

```

C   расчет сопла с парогенерирующей решеткой на входе
C   (обратная задача, задан закон распределения стат. давления)
DIMENSION B(10),C(10)
REAL IV,ILTL0,ID,IVTD,JVI,JVC,LAMV,ISTAR
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
YIV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
OPEN (2,FILE='L27B.DAT')
OPEN (6,FILE='CON')
OPEN (8,FILE='REZL27B.DAT')
READ(2,*) N,DX,GCR,GV1,TL0,PL0,PSR,TD1,PV1,
& UGC,AMV,PI,KK,DD1,B3,CV1,CD1,Z
print *,Z
ILTL0=YIL(TL0)*GCR
TV1=5.677*PV1**0.25+273.
GD1=GCR-GV1
ROV1=1.213E-5*PV1**0.9375
FV1=GV1/ROV1/CV1
FD1=GD1/RO(TD1)/CD1
FN1=FV1+FD1
DN1=(4.*FN1/PI)**0.5

ISTAR=GV1*(YIV(TV1)+CV1**2/2.)+GD1*(YIL(TD1)+CD1**2/2.)
TD=TD1
PV=PV1
CV=CV1
CD=CD1
GV=GV1
FN=FN1
DN=DN1
DD=DD1
ROD=RO(TD)
TV=5.677*PV**0.25+273.
ROV=1.213E-5*PV**0.9375

```

```

IV=YIV(TV)
CPD=CPL(TD)
ID=YIL(TD)
ROSGR=ROD*(1.-PI*2.**0.5/6.)
N=6
IS=0
B(1)=PV
B(2)=GV
B(3)=DD
B(4)=CV
B(5)=CD
B(6)=TD
K=0
X=0
140  X=X+DX
      K=K+1
      A=X
      DO 150 LL=1,4
      GD=GCR-GV
      XV=GV/GCR
      ROD=RO(TD)
      ROV=1.213E-5*PV**.9375
      TV=5.677*PV**.25+273.
      SQ=SQV(TV)
      VISV=(8.35+3.42E-2*(TV-273.)+2E-5*(TV-273.)**2)*1E-6
      FV=GV/ROV/CV
      FD=GD/ROD/CD
      FN=FV+FD
      DN=(4.*FN/PI)**0.5
      RED=ABS(CV-CD)*DD*ROV/VISV
      IF(RED.GT.0.AND.RED.LE.1.)CX=24./RED
      IF(RED.GT.1.AND.RED.LE.390.)CX=24./RED**.667
      IF(RED.GT.390.)CX=.45
      DSTAR=CX*PI*DD**2*ROV*ABS(CV-CD)*(CV-CD)/8.
      REV=CV*DN*ROV/VISV
      CF=.079/REV**.25
      TW=CF*ROV*CV**2/2.
      PRV=1.28-4.4E-3*(TV-273.)+2.4E-5*(TV-273.)**2
      LAMV=(1.801+2.69E-3*(TV-273.)+3.02E-5*(TV-273.)**2)*1.E-2
      PPROV=8.805129E4*PV**62.5E-3
      ALFA=(2.+6*RED**.5*PRV**.33)*LAMV/DD
      GCV=UGC/AMV

```

```

PVTD=((TD-273.)/5.667)**4
CAP=B3/(PV**0.56)
JVI=PVTD*CAP/(1.-.4*CAP)/(2.*GCV*PI*TD)**.5
JVC=PV*CAP/(1.-.4*CAP)/(2.*GCV*PI*TV)**.5
RJV=JVI-JVC
IVTD=YIV(TD)
IV=YIV(TV)
CPD=CPL(TD)
CPIT=(CPL(TL0)+CPL(TV))/2.
DHR=CPIT*((TL0-TV)-TV*ALOG(TL0/TV))
SCVD=(2.*DHR)**0.5
FIN=((GV*CV**2+GD*CD**2)/(GCR*SCVD**2))**.5
PA=PV1/((PV1/PSR-1.)*(X/Z)**2+1.)
C(1)=-2.*PV1*(PV1/PSR-1.)*A/Z**2/(((PV1/PSR-1.)
& *(A/Z)**2+1.))**2)
C(2)=6.*RJV*GD/CD/ROD/DD
C(3)=-2.*RJV/ROD/CD
C(4)=-C(1)*GV/CV/ROV+6.*DSTAR*GD/CD/PI/(DD**3)/ROD
& +TW*PI*DN+(CV-CD)*C(2))/GV
C(5)=-C(1)/ROD/CD+6.*DSTAR/PI/(DD**3)/ROD/CD
C(6)=-6.*(SQ*RJV+ALFA*(TD-TV))/CPD/ROD/DD/CD
CALL RKM(A,DX,N,IS,B,C)
PV=B(1)
GV=B(2)
DD=B(3)
CV=B(4)
CD=B(5)
150 TD=B(6)
TDSR=TD
WRITE(6,*) ' X=',X,' PV=',PV,' CV=',CV,' CD=',CD
IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X,' PV=',PV,' GV=',GV,' GD=',GD,
& ' DD=',DD,' CV=',CV,' CD=',CD,' TV=',TV,' TD=',TD,' FN=',FN,
& ' DN=',DN,' FIN=',FIN,' SCVD=',SCVD,' PA=',PA,' PV1=',PV1,
& ' XV=',XV
IF(K.EQ.KK)K=0
IF(X.LT.Z)GOTO 140
OPEN (3,FILE='TURB8A.DAT')
WRITE (3,*) TDSR,TL0,DD,PV,CV,CD,XV
STOP
END

```

Файл данных L27B.DAT

6 0.01E-3 0.193 0.0036 421. 0.473E6 1E5 419. 0.355E6
 8314. 18. 3.1416 10 20.E-6 1.038 2. 1.5 0.15
 N DX GCR GV TL0 PL0 PSR TD1 PV1
 UGC AMV PI KK DD1 B3 CV1 CD1 Z

Описание программы TURB8

Программа позволяет определить мощность рабочего колеса гидропаровой турбины (ГПТ), работающей на высоковлажном пароводяном потоке. В расчете используется трехскоростная модель термически неравновесного потока. Оценка сепарационных свойств рабочего канала ГПТ в относительном движении с учетом центробежных и кориолисовых сил показала, что для узких лопаток с удлиненной входной и короткой выходной частью пера при высокой скорости пристенного жидкостного слоя ($w_{пл}=30...50$ м/с) количество отсепарированной жидкости составляет около 10% от расхода воды через ГПТ. В этом случае правомерен расчет рабочего канала в двумерной постановке.

Задача решается в полярной системе координат. Граничные условия на входе в канал в относительном движении (скорости пара и капель, давление и температура потока) определяются на основе расчета соплового аппарата. При расчете колеса считалось, что угол атаки капельной составляющей близок к нулю. По изменению количества движения двухфазного потока (пар-капли-пленка) определялся импульс силы и мощность ступени. Для упрощения пояснений текст программы разбит на 28 смысловых блоков.

Блок I. Описание рабочих массивов программы.

Блок II. Определение общих областей памяти.

Блок III. Описание операторов-функций CP1, CP1T, PSI, SPEED, RAD.

CP1 – теплоемкость воды при текущей температуре,

CP1T - определение средней теплоемкости в интервале температур от начальной до текущей,

PSI – определение угла атаки,

SPEED – расчет скорости по теореме косинусов,

RAD – перевод углов в радианную меру.

Блок IV. Открытие файлов для ввода и вывода данных.

Блок V. Определение значений искомых величин и теплофизических свойств воды и пара на входе в канал. Теплофизические свойства рассчитываются путем интерполяции по заданным в исходных файлах табличным значениям с помощью подпрограмм SPLINE (вычисляющей коэффициенты интерполяционных кубических

полиномов) и SEVAL (определяющей значение соответствующей величины и ее первой и второй производной при произвольном значении аргумента).

Блок VI. Построение расчетной сетки, определение начальных скоростей капель и пара в относительном движении, проекций скорости на тангенциальное и радиальное направления.

Блок VII. Начало цикла по углу (DO 26) и по радиусу при текущем значении φ (DO 23).

Блок VIII. Обработка ячеек без капель (вызов подпрограммы EMPTY). Скорость пара WP и давление P в таких ячейках остаются без изменения.

Блок IX. Решение системы 4-х дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутты для двух составляющих скорости капель RWK и FWK, температуры капель ТК и радиуса R с вызовом подпрограммы DROP для расчета правых частей дифференциальных уравнений.

Блок X. Решение полной системы из 7-ми уравнений для двухфазного потока и определение скоростей капли RWK, FWK, радиуса R, давления P, скорости пара WP, температуры капли ТК и диаметра капли DK с вызовом подпрограммы VAP для расчета правых частей дифференциальных уравнений.

Блок XI. Повторное (уточняющее) решение той же системы уравнений с учетом значений искоемых переменных, полученных на этапе X.

Блок XII. Подготовительные операции для расчета движения пленки жидкости – определение концентрации выпавших капель и толщины пленки. Исключение ячеек, занятых пленкой, из расчета движения пара и капель путем переиндексации значений RWK, FWK, ТК и R.

Блок XIII. Решение системы трех уравнений относительно скорости WPL, толщины DPL и температуры TPL пленки жидкости с вызовом подпрограммы FILM для расчета правых частей дифференциальных уравнений. Определение расхода жидкости в пленке.

Блок XIV. Определение текущего расхода пара, проверка условий окончания счета, определение к.п.д. турбины, окончание счета.

Блок XV. Подпрограмма DROP для вычисления правых частей системы уравнений (9.11), описывающей движение капель в потоке пара постоянных параметров.

Блок XVI. Подпрограмма VAP для вычисления правых частей системы уравнений (9.10, 9.9, 9.14, 9.6, 9.12, 9.13, 9.15), описывающей движение пара и капель в канале с учетом взаимного влияния фаз.

Блок XVII. Подпрограмма FILM для расчета правых частей системы дифференциальных уравнений (9.12, 9.13, 9.15) для определения скорости TPL, толщины DPL и температуры TPL жидкой пленки.

Блок XVIII. Подпрограмма EMPTY, не изменяющая никаких параметров потока, для обработки ячеек без капель.

Блок XIX. Подпрограмма-функция CX для определения силы межфазного трения на границе раздела капля-пар.

Блок XX. Подпрограмма-функция WC для определения коэффициента трения на границе жидкая пленка-стенка канала.

Блок XXI. Подпрограмма-функция ALKP для расчета коэффициента теплоотдачи между каплями и паром.

Блок XXII. Подпрограмма-функция ALPLP для расчета коэффициента теплоотдачи между пленкой и паром.

Блоки XXIII-XXV. Подпрограммы RKF45, RKFS и FENL, реализующие метод Рунге-Кутты-Фельдберга.

Блок XXVI. Подпрограмма SPLINE для вычисления коэффициентов интерполяционных полиномов по табличным данным.

Блок XXVII. Подпрограмма SEVAL для определения значения функции по заданному значению аргумента.

Идентификаторы программы

NK – число ячеек в направлении радиуса канала

NZ – число ячеек, занятых пленкой при текущем значении φ

Y – массив значений искомых функций

YP – массив значений правых частей дифференциальных уравнений

R – массив значений радиусов капель при текущем значении φ

U – переносная скорость

RWK – проекция скорости капли на ось R

FWK – проекция скорости капли на ось φ

WP – скорость пара

WPL – средняя по толщине скорость пленки

DELPL – толщина пленки

P – давление пара

TVS – температура насыщения пара

TK – температура капель

TP – температура пара

TPL – температура пленки

X – степень сухости пара

DK – диаметр капель

GK – общий массовый расход рабочего тела через канал

DGK – расход жидкости в капельном потоке

VGK – расход пара

GPL – расход жидкости в пленке
 BAR – массив табличных значений давления
 TEMP – массив табличных значений температуры насыщения пара
 VPA – массив табличных значений удельного объема сухого насыщенного пара
 VKAP - массив табличных значений удельного объема насыщенной воды
 ENTP - массив табличных значений энтальпии пара
 ENTH - массив табличных значений энтальпии воды
 VP – текущее значение удельного объема пара
 VK – текущее значение удельного объема жидкости в капле
 VPL – текущее значение удельного объема жидкости в пленке
 ALKP – коэффициент теплоотдачи от капель к пару
 ALPLP - коэффициент теплоотдачи от пленки к пару
 RJKP – поток массы от капель к пару
 SQ – теплота испарения воды при текущем значении температуры жидкости
 PSI – оператор-функция для вычисления угла атаки
 VOR – число оборотов турбины
 HB – высота лопатки
 BL – число блоков сопел
 RBL – число рабочих блоков сопел
 ALF – угол наклона сопла
 ZERO – угол входа в межлопаточный канал
 RM – средний радиус лопатки
 A1, A2 – начальные значения скорости и толщины пленки
 UGC – универсальная газовая постоянная
 GCV – газовая постоянная пара
 R1, R2 – текущие значения радиусов спинки и корыта лопатки

PROGRAM TURB_8

C Программа позволяет выполнить расчет сопла,
 C работающего на вскипающей воде, межлопаточного
 C канала гидропаровой турбины, мощность на среднем
 C радиусе колеса, лопаточный КПД и движение капель
 C за рабочим колесом.
 C

EXTERNAL DROP,VAP,FILM,EMPTY
 REAL
 R(110),TK(110),RWK(110),FWK(110),WP(110),P(110),DK(110),

```

&
Y(7),WORK(51),BAR(5),VPA(5),VKAP(5),ENT(5),ENTS(5),TEMP(5),
& CP(5),BE(5),CE(5),DE(5),BES(5),CES(5),DES(5),BCP(5),CCP(5),
&
DCP(5),TPA(5),BTPA(5),CTPA(5),DTPA(5),BVPA(5),CVPA(5),DVPA
(5),
&
BVKAP(5),CVKAP(5),DVKAP(5),DAVL(5),BENS(5),CENS(5),DENS(
5),
& ENTN(5)
INTEGER IWORK(5)

```

```

COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
COMMON /GEO/ FIP,GCV,B1,L,FI1,XFI1,P1
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
COMMON /NET/ RT,TCKR,TTCKF,CV2,CV3,CV4
COMMON /ENE/ ENTK,ENTP,EPTK,TP,CPK,EPL,EPPL,CPPL

```

II

```

DATA PI/3.1415926/,PF/180./
CP1(B)=4331.-3.09*(B-273.)+1.98E-2*(B-273.)**2
CPIT(B)=(CP1(B)+CP1(TL0))/2.
PSI(A)=ZERO-ATAN(A*SIN(ALF)/(A*COS(ALF)-U))
SPEED(A)=SQRT(A**2+U**2-2.*A*U*COS(ALF))
RAD(A)=A*PI/PF

```

III

```

OPEN (2,FILE='TURB8.DAT')
OPEN (3,FILE='TURB8A.DAT')
OPEN (4,FILE='TU8REZ.DAT')
OPEN (5,FILE='CON')
OPEN (6,FILE='TUR_DR.DAT')

```

IV

```

READ(2,*) VISP,VISK,FI1,FI2,BL,RBL,PROP,HB,ALF,
& ZERO,RM,FIS,DELF,A1,A2,UGC,AMV,B1,R1,R2,R3,R4,NK,TG,
& VOR,(BAR(I),I=1,5),
& (TEMP(I),I=1,5),(VPA(I),I=1,5),(VKAP(I),I=1,5),(ENT(I),I=1,5),
& (ENTS(I),I=1,5),(CP(I),I=1,5),(TPA(I),I=1,5),(DAVL(I),I=1,5),
&(ENTN(I),I=1,5),EPS
READ (3,*) TK0,TL0,DK0,P0,CV,CK,X
PRINT *, 'DK0=',DK0,'R1=',R1,'R2=',R2,'NK=',NK,'TG=',TG
PRINT *, 'SKOL=',CK/CV,'VOR=',VOR,'P0=',P0,'X=',X
U=PI*VOR/30.*RM
XFII=RAD(FI1)*R2
GCV=UGC/AMV
ZERO=RAD(ZERO)
ALF=RAD(ALF)
FIP=RAD(FIS)

```

V

$TVS=5.677*P0^{**0.25}+273.$
 $CPLT1=CPIT(TVS)$
 $DHR=CPLT1*((TL0-TVS)-TVS*ALOG(TL0/TVS))$
 $GTR=TG*BL/RBL$
 $PTI=GTR*DHR$
 $CALL\ SPLINE\ (5, BAR, VPA, BVPA, CVPA, DVPA)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, DAVL, ENTN, BENS, CENS, DENS)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, BAR, TPA, BTPA, CTPA, DTPA)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, TEMP, ENT, BE, CE, DE)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, TEMP, ENTS, BES, CES, DES)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, TEMP, CP, BCP, CCP, DCP)$
 $CALL\ SPLINE\ (5, BAR, VKAP, BVKAP, CVKAP, DVKAP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, P0, BAR, VPA, BVPA, CVPA, DVPA, VP, VPP, VPPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, VKAP, BVKAP, CVKAP, DVKAP, VK, VKP, VKPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, ENTS, BES, CES, DES, EPTK, EPTKP, EPTKPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, ENT, BE, CE, DE, ENTK, ENTKP, ENTKPP)$
 $CALL\ SEVAL\ (5, P0, BAR, TPA, BTPA, CTPA, DTPA, TP, TPP, TPPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, CP, BCP, CCP, DCP, CPK, CPKP, CPKPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, P0, DAVL, ENTN, BENS, CENS, DENS, ENTP, ENTPP, ENTPPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, VKAP, BVKAP, CVKAP, DVKAP, VPL, VPLP, VPLPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, CP, BCP, CCP, DCP, CPPL, CPPLP, CPPLPP)$
 $CALL\ SEVAL\ (5, TK0, TEMP, ENT, BE, CE, DE, EPL, EPLP, EPLPP)$
 $CALL\ SEVAL$
 $(5, TK0, TEMP, ENTS, BES, CES, DES, EPPL, EPPLP, EPPLPP)$

V

$FID=FIP/DELF$
 $GK=TG*BL/(RBL*PROP)$
 $DGK=GK*(1.-X)$
 $VGK=GK*X$
 $PNV=6.*VK*DGK/(DK0^{**3}*PI)$
 $DRS=(R2-R1)/NK$
 $VOL=DRS*FIP$
 $WKIN=CK*COS(ALF)-U$
 $WPIN=CV*COS(ALF)-U$
 $DPSI=PSI(CK)$

VI

```

VPSI=PSI(CV)
WRITE(4,*) ' Угол атаки капель =' ,DPSI*PI/PI
WRITE(4,*) ' Угол атаки пара =' ,VPSI*PI/PI
WRITE(4,*) ' GK=' ,GK,'DGK=' ,DGK,'VGK=' ,VGK,'PNV=' ,PNV
NR=NK
PNVA=6.*(GK-
SPEED(CV)*COS(VPSI)*DRS*NK*HB/VP)/(PI*DK0**3*
& (COS(DPSI)/VK-SPEED(CV)*COS(VPSI)/SPEED(CK)/VP))
SK=PNVA/(NK*HB)
C
VGKA=SPEED(CV)*COS(VPSI)/VP*DRS*NK*HB/(1.+SPEED(CV)*
COS(VPSI)/VP
C & *(1.-X)*VK/X/SPEED(CK)/COS(DPSI))*BL/RBL
C DGKA=VGKA*(1.-X)/X
C GKA=VGKA+DGKA
C PNVA=6.*VK*DGKA/(DK0**3*PI)
WRITE(4,*) '
GK*=' ,GKA,'DGK*=' ,DGKA,'VGK*=' ,VGKA,'PNV*=' ,PNVA
C DELTAV=ABS(VGK-VGKA)/VGK*100.
C IF (DELTAV.GE.EPS) PRINT *, 'Необходима балансировка
сопла'
C IF (DELTAV.GE.EPS) GO TO 116
A0=SPEED(CV)*COS(VPSI)*(R2-R1)/ALOG(R2/R1)
DO 1 I=1,NK
R(I)=R1+(R2-R1)/NK/2.+(R2-R1)/NK*(I-1)
IF(I.EQ.NK)PRINT *,'R(NK)=' ,R(NK)

RWK(I)=SPEED(CK)*SIN(DPSI)
FWK(I)=SPEED(CK)*COS(DPSI)
WP(I)=A0/R(I)
TK(I)=TK0
DK(I)=DK0
CALL SEVAL
(5,P0,BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
P(I)=P0-A0**2/VP/2.*(1./R(I)**2-1./((R2-R1)/ALOG(R2/R1))**2)
CALL SEVAL
(5,P(I),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
P(I)=P0-A0**2/VP/2.*(1./R(I)**2-1./((R2-R1)/ALOG(R2/R1))**2)
1 CONTINUE
WPL=0.
DELPL=0.
TPL=0.

```



```

RELERR=0.6E-6
ABSERR=0.
TFINAL=FIP
TPRINT=FID
IFLAG=1
TOUT=T
K=1
Y(1)=P(I)
Y(2)=WP(I)
CALL SEVAL
(5,P(I),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
2  CALL
RKF45(EMPTY,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,
IWORK)
  CALL SEVAL
(5,Y(1),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  GOTO (22,3,17,18,19,20,21,22),IFLAG
3  TOUT=T+TPRINT
  IF(T.LT.TFINAL) GOTO 2
  WRITE(4,102) I,Y(2),Y(1)*1E-5
102  FORMAT(T2,'I',T5,I2,T8,'I',T18,'I',T29,'I',T40,'I',T42,F7.3,T50
& 'I',T52,F6.4,T59,'I',T69,'I',T79,'I')
  DP=(Y(1)-P(I))/FIP
  WP(I)=Y(2)
  P(I)=Y(1)
  IF(I.EQ.NK) WRITE(4,101)
  IF(RS.GE.R2-DELPL) GOTO 14
  GOTO 23
4  CV2=RV1
  CV3=RV2
  CV4=RV3

```

```

NEQN=4
T=0.
Y(1)=RWK(I)
Y(2)=FWK(I)
Y(3)=R(I)
Y(4)=TK(I)
DD=DK(I)
RELERR=0.6E-6
ABSERR=0.
TFINAL=FIP
TPRINT=FID

```

IX

IX

```

IFLAG=1
TOUT=T
K=2
CALL SEVAL
(5,P0,BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL (5,P0,BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
5  CALL
RKF45(DROP,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,I
WORK)
  TD=Y(4)
  CALL SEVAL
(5,P0,BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
  CALL SEVAL (5,P0,BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
  CALL SEVAL (5,TD,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPK,CPKP,CPKPP)
  CALL SEVAL
(5,P0,DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
  CALL SEVAL (5,TD,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPK,CPKP,CPKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
  GOTO (22,6,17,18,19,20,21,22),IFLAG
6  TOUT=T+TPRINT
  IF(T.LT.TFINAL) GOTO 5
  RT=Y(3)
  IF(I.EQ.NK)PRINT *,' DROP: R(NK)=' ,R(NK)
  TCKR=Y(1)
  TCKF=Y(2)


---


NEQN=7
Y(1)=RWK(I)
Y(2)=FWK(I)
Y(3)=R(I)

```

```

Y(4)=P(I)
Y(5)=WP(I)
Y(6)=TK(I)
Y(7)=DK(I)
T=0.
TFINAL=FIP
TPRINT=FID
IFLAG=1
TOUT=T
K=3
CALL SEVAL
(5,P(I),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL (5,P(I),BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
7  CALL
RKF45(VAP,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,IW
ORK)
  TD=Y(6)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
  CALL SEVAL (5,TD,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPK,CPKP,CPKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
  GOTO (22,8,17,18,19,20,21,22),IFLAG
8  TOUT=T+TPRINT
  IF(T.LT.TFINAL) GOTO 7
  RT=Y(3)
  TCKR=Y(1)
  TCKF=Y(2)
  IF(I.EQ.NK)PRINT *,'VAP1: R(NK)=',R(NK)
  CV2=RV1
  CV3=RV2
  CV4=RV3


---


NEQN=7
Y(1)=RWK(I)

```

```

Y(2)=FWK(I)
Y(3)=R(I)
Y(4)=P(I)
Y(5)=WP(I)
Y(6)=TK(I)
Y(7)=DK(I)
T=0.
TFINAL=FIP
TPRINT=FID
IFLAG=1
TOUT=T
K=4
CALL SEVAL
(5,P(I),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL (5,P(I),BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
9  CALL
RKF45(VAP,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,IW
ORK)
  TD=Y(6)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
  CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
  CALL SEVAL (5,TD,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPK,CPKP,CPKPP)
  CALL SEVAL
(5,Y(4),DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
  GOTO (22,10,17,18,19,20,21,22),IFLAG
10  TOUT=T+TPRINT
  IF(T.LT.TFINAL) GOTO 9
  WRITE(4,103)I,Y(1),Y(2),Y(3)*1E3,Y(5),Y(4)*1E-5,Y(6),Y(7)*1E6
103  FORMAT(T2,'I',T5,I2,T8,'I',T10,F7.4,T18,'I',T20,F8.4,T29,'I',
& T31,F8.4,T40,'I',T42,F7.3,T50,'I',T52,F6.4,T59,'I',T61,F7.3,
& T69,'I',T71,F7.4,T79,'I')
  DP=(Y(4)-P(I))/FIP
  CM=Y(2)
  RWK(I)=Y(1)

```

```

FWK(I)=Y(2)
R(I)=Y(3)
IF(I.EQ.NK)PRINT *,'VAP2: R(NK)=',R(NK)
P(I)=Y(4)
WP(I)=Y(5)
TK(I)=Y(6)
DK(I)=Y(7)
A3=TK(I)
RV1=CV2
RV2=CV3
RV3=CV4

```

XI

```

IF(I.EQ.NK) WRITE(4,101)
IF(RS.LT.R2-DELPL) GOTO 23
DO 11 IS=1,NK
IF(R(IS).GE.R2-DELPL) NZ=NZ+1
11 CONTINUE
PRINT *,'NZ=',NZ
IF(NZ.EQ.0) GOTO 14
NR=NR-NZ
DO 12 IT=1,NR
R(NK-IT+1)=R(NK-NZ-IT+1)
RWK(NK-IT+1)=RWK(NK-NZ-IT+1)
FWK(NK-IT+1)=FWK(NK-NZ-IT+1)
TK(NK-IT+1)=TK(NK-NZ-IT+1)
12 CONTINUE
DO 13 IU=1,NK-NR
R(IU)=0.
13 CONTINUE
14 DD=DK(I)
DG=NZ*SK*PI*DD**3/6./FIP
PRINT *,'DG=',DG,'DELPL=',DELPL
IF(DG.EQ.0..AND.DELPL.EQ.0.) GOTO 23

```

XII

```

NEQN=3
T=0.
TFINAL=FIP
TPRINT=FID
IFLAG=1
TOUT=T
K=5
PRINT *,' K=5'
Y(1)=WPL
IF(Y(1).EQ.0.) Y(1)=A1*CM

```

XIII

```

Y(2)=DELPL
IF(Y(2).EQ.0.) Y(2)=DG/Y(1)*FIP*A2
PK=WP(I)
DD=DK(I)
Y(3)=TPL
IF(Y(3).EQ.0.) Y(3)=A3
P1=P(I)
CALL SEVAL
(5,P1,BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
CALL SEVAL (5,P1,BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
CALL SEVAL
(5,TPL,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VPL,VPLP,VPLPP)
CALL SEVAL
(5,TPL,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPPL,CPPLP,CPPLPP)
CALL SEVAL (5,TD,TPL,ENT,BE,CE,DE,EPL,EPLP,EPLPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TPL,ENTS,BES,CES,DES,EPPL,EPPLP,EPPLPP)
CALL SEVAL
(5,P1,DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
15 CALL
RKF45(FILM,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,IW
ORK)
TPL=Y(3)
CALL SEVAL
(5,P1,BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPTK,EPTKP,EPTKPP)
CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,ENT,BE,CE,DE,ENTK,ENTKP,ENTKPP)
CALL SEVAL (5,P1,BAR,TPA,BTPA,CTPA,DTPA,TP,TPP,TPPP)
CALL SEVAL
(5,TPL,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VPL,VPLP,VPLPP)
CALL SEVAL
(5,TPL,TEMP,CP,BCP,CCP,DCP,CPPL,CPPLP,CPPLPP)

```

```

CALL SEVAL (5,TPL,TEMP,ENT,BE,CE,DE,EPL,EPLP,EPLPP)
CALL SEVAL
(5,TPL,TEMP,ENTS,BES,CES,DES,EPPL,EPPLP,EPPLPP)
CALL SEVAL
(5,P1,DAVL,ENTN,BENS,CENS,DENS,ENTP,ENTPP,ENTPPP)
GOTO (22,16,17,18,19,20,21,22),IFLAG
16 TOUT=T+TPRINT
IF(T.LT.TFINAL) GOTO 15
WPL=Y(1)
DELPL=Y(2)
TPL=Y(3)
GPL=WPL*DELPL/VPL*HB
WRITE(4,*) ' WPL=',Y(1),'DEL=',Y(2),'GPL=',GPL,'TPL=',Y(3)
PRINT*, ' WPL=',Y(1),'DEL=',Y(2),'GPL=',GPL,'TPL=',Y(3)
GOTO 24
17 PRINT *,RELERR,ABSERR
GOTO (2,5,7,9,15),K
18 PRINT *, ' МНОГО ШАГОВ'
GOTO (2,5,7,9,15),K
19 ABSERR=1E-6
PRINT *,RELERR,ABSERR
GOTO (2,5,7,9,15),K
20 RELERR=10*RELERR
PRINT *,RELERR,ABSERR
IFLAG=2
GOTO (2,5,7,9,15),K
21 PRINT *, ' МНОГО ДАННЫХ'
IFLAG=2
GOTO (2,5,7,9,15),K
22 PRINT *, ' НЕВЕРНЫЙ ВЫЗОВ'
STOP
23 CONTINUE
PRINT *,'R(NK)=' ,R(NK),' R2=' ,R2
24 IF(DELPL.GE.IX*DRS) IY=1
IF(IY.EQ.1) IX=IX+1
NK=NK-IY
IF(FIS*J.NE.FI1) GOTO 26

```

```

R5=R1-R3
R1=R3
R2=R4
DO 25 I=1,NK
IF(R(I).NE.0.) R(I)=R(I)-R5

```

```

25 CONTINUE
26 CONTINUE
   GVOUT=0.
   F2V=0.
   WP1=0.
   VP1=0.
   DO 27 I=1,NK
   CALL SEVAL
(5,P(I),BAR,VPA,BVPA,CVPA,DVPA,VP,VPP,VPPP)
   IF(I.NE.NK) G=DRS*HB*WP(I)/VP
   IF(I.EQ.NK) G=(DRS-DELPL)*HB*WP(I)/VP
   F2V=F2V+G*WP(I)*COS(ZERO)
   GVOUT=GVOUT+G
   WP1=WP1+(1./VP)*WP(I)
   VP1=VP1+1./VP
27 CONTINUE
   WP1=WP1/VP1
   F1D=GK*(WKIN*(1.-X))
   F1V=GK*WPIN*X
   F2F=GPL*WPL*COS(ZERO)
   FK=F1D+F1V+F2V+F2F
   GDOUT=0.
   IF(NR.EQ.0.) GOTO 29
   DSIG=0.
   DO 28 I=1,NR
   DSIG=DSIG+FWK(I)*COS(ZERO)-RWK(I)*SIN(ZERO)
28 CONTINUE
   CALL SEVAL
(5,TD,TEMP,VKAP,BVKAP,CVKAP,DVKAP,VK,VKP,VKPP)
   DD=DK(I)
   GD=SK/VK*HB*PI*DD**3/6.
   GDOUT=GD*NR
   F2D=GD*DSIG
   FK=FK+F2D
29 RNK=U*FK
   RNT=PROP*RNK
   EFT=RNT/PTI
   WRITE(4,111)
111 FORMAT(79(' ')/T2,'I',T9,'I',T23,'I',T29,'GK',T37,
   & 'I',T43,'GPL',T51,'I',T57,'G',T65,'I',T71,'TG',T79,'I')
   WRITE(4,112)
112 FORMAT(T2,'I_____I',5('_____KG/C_____I'))

```

XIV

XIV

```

WRITE(4,113) VGK,DGK,GK,TG
113 FORMAT(T2,'I',T4,'IN',T9,'I',T12,F9.7,T23,'I',T26,F9.7,T37,
& 'I',T40,'0.000000',T51,'I',T54,F9.7,T65,'I',T68,F9.5,T79,'I')
TGOUT=(GVOUT+GDOUT+GPL)*RBL*PROP/BL
WRITE(4,114)
GVOUT,GDOUT,GPL,GVOUT+GDOUT+GPL,TGOUT
114 FORMAT(T2,'I',T4,'OUT',T9,'I',T12,F9.7,T23,'I',T26,F9.7,T37,
& 'I',T40,F9.7,T51,'I',T54,F9.7,T65,'I',T68,F9.5,T79,'I')
WRITE(4,115)
115 FORMAT(T2,'I',I5('I'))
WRITE(4,*) 'F1V=',F1V,'F1D=',F1D
WRITE(4,*) 'F2V=',F2V,'F2F=',F2F,'F2D=',F2D
WRITE(4,*) 'FK=',FK,'RNK=',RNK,'RNT=',RNT,' EFT=',EFT
WRITE(6,*)VOR,WPL,WP1,VISP,VP,VK
CLOSE(6)
STOP
END

```

```

SUBROUTINE DROP(FI,Y,YP)
REAL Y(4),YP(4)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
COMMON /ENE/ ENTK,ENTP,EPTK,TP,CPK,EPL,EPPL,CPPL
CDR=CX(Y(1),Y(2),PK)*Y(3)/Y(2)
SQ=(2447.7-1.283*(TP-273.)-6.26E-3*(TP-273.)**2)*1E3
YP(1)=Y(2)-CDR*Y(1)
YP(2)=-Y(1)+CDR*(PK-Y(2))
YP(3)=Y(3)*Y(1)/Y(2)
YP(4)=ALKP(Y(1),Y(2),PK,TP,DD)*(Y(4)-
TP)*6.*Y(3)/DD*VK/Y(2)
& /CPK*(ENTK/SQ-1.)-1./CPK*(Y(1)*YP(1)+Y(2)*YP(2))
RETURN
END

```

XV

```

SUBROUTINE VAP(FI,Y,YP)
REAL Y(7),YP(7)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
COMMON /NET/ RT,TCKR,TTCKF,CV2,CV3,CV4
COMMON /ENE/ ENTK,ENTP,EPTK,TP,CPK,EPL,EPPL,CPPL
ENV=SET(Y(3),RT,Y(1),TCKR,Y(2),CV2,CV3,CV4)
ENV=PI*Y(7)**3*ENV/(6.-PI*Y(7)**3*ENV)
CX1=CX(Y(1),Y(2),Y(5))
CDR=CX1*Y(3)/Y(2)

```

XVI

```

RW=Y(1)/Y(2)
SQ=(2447.7-1.283*(TP-273.)-6.26E-3*(TP-273.)**2)*1E3
RJKP=ALKP(Y(1),Y(2),Y(5),TP,Y(7))*(Y(6)-TP)/SQ
YP(1)=Y(2)-CDR*Y(1)
YP(2)=-Y(1)+CDR*(Y(5)-Y(2))
YP(3)=Y(3)*RW
DIFK=(CX1*Y(7)/VK+6.*RJKP)*(1.-Y(2)/Y(5))
YP(4)=-Y(5)/(1.+Y(5)**2*VPP/VP**2)*(DIFK+6.*
& RJKP*(1.-VK*Y(5)/(VP*Y(2))))*ENV*(RS-DRS/2.)/Y(7)
YP(5)=-VP*YP(4)/Y(5)-DIFK*ENV*(RS-DRS/2.)*VP/Y(7)
YP(6)=ALKP(Y(1),Y(2),Y(5),TP,Y(7))*(Y(6)-TP)*6.*Y(3)/Y(7)
& *VK/Y(2)/CPK*(ENTK/SQ-1.)-
1./CPK*(Y(1)*YP(1)+Y(2)*YP(2))
YP(7)=-2.*RJKP*Y(3)*VK/Y(2)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FILM(FI,Y,YP)
REAL Y(3),YP(3)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
COMMON /GEO/ FIP,GCV,B1,L,FI1,XF11,P1
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
COMMON /ENE/ ENTK,ENTP,EPTK,TP,CPK,EPL,EPPL,CPPL
IF(Y(1).LE.0..OR.Y(1).GE.100.) RJPLP=0.
IF(Y(1).LE.0..OR.Y(1).GE.100.) GOTO 100
SQ=(2447.7-1.283*(TP-273.)-6.26E-3*(TP-273.)**2)*1E3
RJPLP=ALPLP(Y(1),Y(2))*(Y(3)-TP)/SQ
100 YP(1)=-DP/Y(1)*VPL+(CM-Y(1))*DG/Y(2)/Y(1)-
R2*Y(1)/Y(2)*WC(Y(1)
& ,Y(2))/2.
YP(2)=(DG-Y(2)*YP(1)-VPL*RJPLP*(R2-Y(2)))/Y(1)
IF(Y(1).LE.0..OR.Y(1).GE.100.) GOTO 200
YP(3)=1./(CPPL*Y(1)*Y(2))*(DG*(ENTK-EPL)+(EPL/SQ-1.)*(R2-
Y(2))*
& VPL*ALPLP(Y(1),Y(2))*(Y(3)-TP))-Y(1)/CPPL*YP(1)
200 CONTINUE
RETURN
END

```

XVII

```

SUBROUTINE EMPTY(FI,Y,YP)

```

```

REAL Y(2),YP(2)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
YP(1)=0.
YP(2)=0.

```

XVIII

```

RETURN
END
FUNCTION SET(RI,ROU,CKRI,CKROU,CKFI,CV2,CV3,CV4)
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
RNV(A,B)=2.*SK*A/(B*RS*VOL)
RO=.5E-6
SET=CV2
CV2=CV3
CV3=CV4
RCX=CX(CKRI,CKFI,PK)
IF(ROU.LE.RS) SET=RNV(ABS(ROU-
RI)+RO,ABS(CKRI+CKROU)+RO)+SET
IF(ROU.GT.RS.AND.ROU.LE.RS+DRS) GOTO 1
IF(ROU.GT.RS+DRS.AND.ROU.LE.RS+2.*DRS) GOTO 2
IF(ROU.GT.RS+2.*DRS) GOTO 3
CM=0.
RETURN
1  PC=CKRI+(CKFI**2/CKRI/RI-RCX)*(RS-RI)
   CM=CKFI+(-CKFI/RI+RCX*(PK-CKFI)/CKRI)*(RS-RI)
   SET=RNV(RS-RI,CKRI+PC)+SET
   CV2=RNV(ROU-RS,PC+CKROU)+CV2
   RETURN
2  DCK=(CKFI**2/CKRI/RI-RCX)*(RS-RI)
   PC1=CKRI+DCK
   PC2=CKRI+DCK/(RS-RI)*(RS+DRS-RI)
   CM=CKFI+(-CKFI/RI+RCX*(PK-CKFI)/CKRI)*(RS-RI+DRS)
   SET=RNV(RS-RI,CKRI+PC1)+SET
   CV2=RNV(DRS,PC1+PC2)+CV2
   CV3=RNV(ROU-RS,PC2+CKROU)
   RETURN
3  DCK=(CKFI**2/CKRI/RI-RCX)*(RS-RI)
   PC1=CKRI+DCK
   PC2=CKRI+DCK/(RS-RI)*(RS+DRS-RI)
   PC3=CKRI+DCK/(RS-RI)*(RS+DRS*2.-RI)
   CM=CKFI+(-CKFI/RI+RCX*(PK-CKFI)/CKRI)*(RS-RI+2.*DRS)
   SET=RNV(RS-RI,CKRI+PC1)+SET
   CV2=RNV(DRS,PC1+PC2)+CV2
   CV3=RNV(DRS,PC2+PC3)+CV3
   CV4=RNV(ROU-RS-2.*DRS,PC3+CKROU)
END

```

XVIII

```

FUNCTION CX(RCK,FCK,PK)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL

```

```

DC=SQRT(RCK**2+(PK-FCK)**2)
REK=DC*DD/VISP/VP
CX=.45
IF(REK.GT.0.AND.REK.LE.1.) CX=24./REK
IF(REK.GT.1..AND.REK.LE.390.) CX=24./REK**.6667
CX=.75*CX*VK/VP*DC/DD
RETURN
END

```

XIX

```

FUNCTION WC(W,TH)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
REPL=W*TH/VISK/VK
IF(REPL.LE.400.) WC=4./REPL
IF(REPL.GT.400..AND.REPL.LE.1000.) WC=2E-7*REPL+.00992
IF(REPL.GT.1000.) WC=.057/REPL**.25
RETURN
END

```

XX

```

FUNCTION ALKP(RCK,FCK,PKP,TP,DDD)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
REK=ABS(PKP-SQRT(RCK**2+FCK**2))*DDD/VISP/VP
PRP=1.28-4.4E-3*(TP-273.)+2.4E-5*(TP-273.)**2*1E-2
PLAM=(1.801+2.69E-3*(TP-273.)+3.02E-5*(TP-273)**2)*1E-2
ALKP=(2.+6*REK**.5*PRP**.33)*PLAM/DDD
RETURN
END

```

XXI

```

FUNCTION ALPLP(WW,DWD)
COMMON /PHIS/ PI,DD,VISP,VISK,VP,VPP,VK,R2,R1,VPL
COMMON /GEO/ FIP,GCV,B1,L,FI1,XF11,P1
COMMON /BAR/ P0,PK,DP,CM,SK,RS,DRS,VOL,DG
COMMON /ENE/ ENTK,ENTP,EPTK,TP,CPK,EPL,EPPL,CPPL
PRP=1.28-4.4E-3*(TP-273.)+2.4E-5*(TP-273.)**2*1E-2
IF(L.LE.FI1) XX=(R2-DWD)*L*PI/180.
IF(L.GT.FI1) XX=(R2-DWD)*(L-FI1)*PI/180.+XF11
REX=ABS(PK-WW)*XX/VISP/VP
PLAM=(1.801+2.69E-3*(TP-273.)+3.02E-5*(TP-273)**2)*1E-2
ALPLP=PLAM/XX*.0296*REX**.8*PRP**.43
RETURN
END

```

XXII

```

SUBROUTINE
RKF45(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,
& IWORK)
EXTERNAL F
INTEGER IWORK(5)

```

```

REAL Y(NEQN),WORK(1)
K1M=NEQN+1
K1=K1M+1
K2=K1+NEQN
K3=K2+NEQN
K4=K3+NEQN
K5=K4+NEQN
K6=K5+NEQN
K7=K6+1
C   WRITE(5,*)' RKFS IN'
C   PRINT *,'RELERR=',RELERR
CALL
RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK(1),
&
WORK(K1M),WORK(K1),WORK(K2),WORK(K3),WORK(K4),WOR
K(K5),
&
WORK(K6),WORK(K7),IWORK(1),IWORK(2),IWORK(3),IWORK(4),
& IWORK(5))
C   WRITE(5,*)' RKFS OUT'
RETURN
END

```

XXIII

```

SUBROUTINE
RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,YP,H,F1,
& F2,F3,F4,F5,SAVRE,SAVAE,NFE,KOP,INIT,JFLAG,KFLAG)
LOGICAL HFAILD,OUTPUT
REAL
Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),F3(NEQN),F4(NEQN),
& F5(NEQN)
EXTERNAL F
DATA REMIN,MAXNFE/1E-12,3000/
IF(NEQN.LT.1)GOTO 10
IF((RELERR.LT.0.).OR.(ABSERR.LT.0.))GOTO 10
MFLAG=IABS(IFLAG)
IF(MFLAG.EQ.0.OR.MFLAG.GT.8)GOTO 10
IF(MFLAG.NE.1)GOTO 20
EPS=1.
5  EPS=EPS/2.
EPSP1=EPS+1
IF(EPSP1.GT.1.)GOTO 5
U26=26*EPS
GOTO 50

```

XXIV


```

10  IFGLAG=8
    RETURN
20  IF(T.EQ.TOUT.AND.KFLAG.NE.3)GOTO 10
    IF(MFLAG.NE.2) GOTO 25
    IF(KFLAG.EQ.3.OR.INIT.EQ.0)GOTO 45
    IF(KFLAG.EQ.4)GOTO 40
    IF(KFLAG.EQ.5.AND.ABSERR.EQ.0.)GOTO 30

IF((KFLAG.EQ.6).AND.(RELERR.LE.SAVRE).AND.(ABSERR.LE.SA
VAE))
    & GOTO 30
    GOTO 50
25  IF(IFLAG.EQ.3)GOTO 45
    IF(IFLAG.EQ.4)GOTO 40
    IF(IFLAG.EQ.5.AND.ABSERR.GT.0.)GOTO 45
30  STOP
40  NFE=0
    IF(MFLAG.EQ.2)GOTO 50
45  IFLAG=JFLAG
    IF(KFLAG.EQ.3)MFLAG=IABS(IFLAG)
50  JFLAG=IFLAG
    KFLAG=0
    SAVRE=RELERR
    SAVAE=ABSERR
    RER=2.*EPS+REMIN
    IF(RELERR.GE.RER)GOTO 55
    RELERR=RER
    IFLAG=3
    KFLAG=3
    RETURN
55  DT=TOUT-T
    IF(MFLAG.EQ.1)GOTO 60
    IF(INIT.EQ.0)GOTO 65
    GOTO 80
60  INIT=0
    KOP=0
    A=T
    CALL F(A,Y,YP)
    NFE=1
    IF(T.NE.TOUT)GOTO 65
    IFLAG=2
    RETURN

```

```

65  INIT=1
    H=ABS(DT)
    TOLN=0.
    DO 70 K=1,NEQN
    TOL=RELERR*ABS(Y(K))+ABSERR
    IF(TOL.LE.0.)GOTO 70
    TOLN=TOL
    YPK=ABS(YP(K))
C   PRINT *,'YPK=',YPK
    IF(YPK*H**5.GT.TOL) H=(TOL/YPK)**.2
70  CONTINUE
    IF(TOLN.LE.0.)H=0.
    H=AMAX1(H,U26*AMAX1(ABS(T),ABS(DT)))
    JFLAG=ISIGN(2,IFLAG)
80  H=SIGN(H,DT)
    IF(ABS(H).GE.2.*ABS(DT))KOP=KOP+1
    IF(KOP.NE.100)GOTO 85
    KOP=0
    IFLAG=7
    RETURN
85  IF(ABS(DT).GT.U26*ABS(T))GOTO 95
    DO 90 KK=1,NEQN
90  Y(KK)=Y(KK)+DT*YP(KK)
    A=TOUT
    CALL F(A,Y,YP)
    NFE=NFE+1
    GOTO 300
95  OUTPUT=.FALSE.
    SCALE=2./RELERR
    AE=SCALE*ABSERR
100 HFAILD=.FALSE.
    HMIN=U26*ABS(T)
    DT=TOUT-T
    IF(ABS(DT).GE.2.*ABS(H))GOTO 200
    IF(ABS(DT).GT.ABS(H))GOTO 150
    OUTPUT=.TRUE.
    H=DT
    GOTO 200
150 H=.5*DT
200 IF(NFE.LE.MAXNFE)GOTO 220
    IFLAG=4
    KFLAG=4

```

```

RETURN
220  CALL FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,F1)
      NFE=NFE+5
      EEOET=0.
      DO 250 K=1,NEQN
      ET=ABS(Y(K))+ABS(F1(K))+AE
      IF(ET.GT.0.)GOTO 240
      IFLAG=5
      RETURN
240  EE=ABS((-2090.*YP(K)+(21970.*F3(K)-15048.*F4(K))+
      & (22528.*F2(K)-27360.*F5(K)))
250  EEOET=AMAX1(EEOET,EE/ET)
      ESTTOL=ABS(H)*EEOET*SCALE/752400.
      IF(ESTTOL.LE.1.)GOTO 260
      HFAILD=.TRUE.
      OUTPUT=.FALSE.
      S=.1
      IF(ESTTOL.LT.59049.)S=.9/ESTTOL**.2
      H=S*H
      IF(ABS(H).GT.HMIN)GOTO 200
      IFLAG=6
      KFLAG=6
      RETURN
260  T=T+H
      DO 270 K=1,NEQN
270  Y(K)=F1(K)
      A=T
C    WRITE(5,*)'F IN'
      CALL F(A,Y,YP)
C    WRITE(5,*)'F OUT'
      NFE=NFE+1
      S=5.
      IF(ESTTOL.GT.1.889568E-4)S=.9/ESTTOL**.2
      IF(HFAILD) S=AMIN1(S,1.)
      H=SIGN(AMAX1(S*ABS(H),HMIN),H)
      IF(OUTPUT)GOTO 300
      IF(IFLAG.GT.0)GOTO 100
      IFLAG=-2
      RETURN
300  T=TOUT
      IFLAG=2
      RETURN

```

 END

```

SUBROUTINE FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,S)
REAL
Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),F3(NEQN),F4(NEQN),
& F5(NEQN),S(NEQN)
CH=H/4.
DO 221 K=1,NEQN
221  F5(K)=Y(K)+CH*YP(K)
CALL F(T+CH,F5,F1)
CH=3.*H/32.
DO 222 K=1,NEQN
222  F5(K)=Y(K)+CH*(YP(K)+3.*F1(K))
CALL F(T+3.*H/8.,F5,F2)
CH=H/2197.
DO 223 K=1,NEQN
223  F5(K)=Y(K)+CH*(1932.*YP(K)+(7296.*F2(K)-7200.*F1(K)))
CALL F(T+12.*H/13.,F5,F3)
CH=H/4104.
DO 224 K=1,NEQN
224  F5(K)=Y(K)+CH*((8341.*YP(K)-845.0*F3(K))+(29440.*F2(K)-
32832.
& *F1(K)))
CALL F(T+H,F5,F4)
CH=H/20520.
DO 225 K=1,NEQN
225  F1(K)=Y(K)+CH*((-6080.*YP(K)+(9295.*F3(K)-
5643.*F4(K)))+(41040.
& *F1(K)-28352.*F2(K)))
CALL F(T+H/2.,F1,F5)
CH=H/7618050.
DO 230 K=1,NEQN
230  S(K)=Y(K)+CH*((902880.*YP(K)+(3855735.*F3(K)-
1371249.*F4(K)))
& +(3953664.*F2(K)+277020.*F5(K)))
RETURN
END

```

XXV

```

SUBROUTINE SPLINE(N,X,Y,B,C,D)
DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
NM1=N-1
IF(N.LT.2) RETURN
IF(N.LT.3) GO TO 50
D(1)=X(2)-X(1)

```

```

C(2)=(Y(2)-Y(1))/D(1)
DO 10 I=2,NM1
D(I)=X(I+1)-X(I)
B(I)=2.0*(D(I-1)+D(I))
C(I+1)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)
C(I)=C(I+1)-C(I)
10  CONTINUE
B(1)=-D(1)
B(N)=-D(N-1)
C(1)=0.0
C(N)=0.0
IF(N.EQ.3) GO TO 15
C(1)=C(3)/(X(4)-X(2))-C(2)/(X(3)-X(1))
C(N)=C(N-1)/(X(N)-X(N-2))-C(N-2)/(X(N-1)-X(N-3))
C(1)=C(1)*D(1)**2/(X(4)-X(1))
C(N)=-C(N)*D(N-1)**2/(X(N)-X(N-3))
15  DO 20 I=2,N
T=D(I-1)/B(I-1)
B(I)=B(I)-T*D(I-1)
C(I)=C(I)-T*C(I-1)
20  CONTINUE
C(N)=C(N)/B(N)
DO 30 IB=1,NM1
I=N-IB
C(I)=(C(I)-D(I)*C(I+1))/B(I)
30  CONTINUE
B(N)=(Y(N)-Y(NM1))/D(NM1)+D(NM1)*(C(NM1)+2.0*C(N))
DO 40 I=1,NM1
B(I)=(Y(I+1)-Y(I))/D(I)-D(I)*(C(I+1)+2.0*C(I))
D(I)=(C(I+1)-C(I))/D(I)
C(I)=3.0*C(I)
40  CONTINUE
C(N)=3.0*C(N)
D(N)=D(N-1)
RETURN
50  B(1)=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))
C(1)=0.0
D(1)=0.0
B(2)=B(1)
C(2)=0.0
D(2)=0.0
RETURN

```

XXVI

XXVI

END

```

SUBROUTINE SEVAL(N,U,X,Y,B,C,D,S,SP,SPP)
DIMENSION X(9),Y(9),B(9),C(9),D(9)
DATA I/1/
IF(I.GE.N) I=1
IF(U.LT.X(I)) GO TO 10
IF(U.LE.X(I+1)) GO TO 30
10  I=1
    J=N+1
20  K=(I+J)/2
    IF(U.LT.X(K)) J=K
    IF(U.GE.X(K)) I=K
    IF(J.GT.I+1) GO TO 20
30  DX=U-X(I)
    S=Y(I)+DX*(B(I)+DX*(C(I)+DX*D(I)))
    SP=B(I)+DX*(2.*C(I)+3.*DX*D(I))
    SPP=2.*C(I)+6.*DX*D(I)
    RETURN
END

```

XXVII

Файл данных TURB8.DAT

```

11.97E-6 297.93E-6 42. 73.64 20. 3. 65.
40.E-3 18. 32.11 .141 1. 1. 2. 0.05E-3
8314. 18. 70. 11.6E-3 18.4E-3 4.8E-3 11.6E-3 52
1.73 3.8E3
1.1E5 9.5E4 8.5E4 7.5E4 6.5E4
380.13 375.32 371.20 368.14 364.78
1.5501 1.7779 1.9728 2.2179 2.5357
.0010495 .0010455 .0010423 .0010400 .0010375
449.19E3 428.84E3 411.49E3 398.63E3 384.45E3
2681.4E3 2680.E3 2673.5E3 2668.6E3 2663.2E3
4.218E3 4.217E3 4.216E3 4.215E3 4.214E3
375.32 371.20 368.14 364.78 361.02
1.1E5 9.5E4 8.5E4 7.5E4 6.5E4
2680.E3 2673.5E3 2668.6E3 2663.2E3 2657.E3
5E8

```

```

VISP VISK FI1 FI2 BL RBL PROP
HB ALF ZERO RM FIS DELF A1 A2
UGC AMV B1 R1 R2 R3 R4 NK
TG VOR
{SPLINE} BAR(I) TEMP(I) VPA(I) VKAP(I) ENT(I)

```

ENTS(I) CP(I) TPA(I) DAVL(I) ENTN(I)
EPS

PROGRAM DROPLET

EXTERNAL DROP

REAL Y(5),WORK(33),CKR(6)

INTEGER IWORK(5)

COMMON CVR,CVU,CVUZ,DD,VISV,VV,VD

DATA PI/3.141592653589/,PF/180./

OPEN(2,FILE='MD.DAT')

OPEN(3,FILE='MD1.DAT')

OPEN(4,FILE='MDREZ.DAT')

OPEN(5,FILE='TUR_DR.DAT')

READ(2,*) RST,RFIN,B2G

CLOSE(2)

READ(3,*) DD,RPRINT,KI

CLOSE(3)

READ(5,*) VOR,WPL,WV,VISV,VV,VD

CLOSE(5)

WRITE(4,*)' VISV=',VISV,' VV=',VV,' VD=',VD

OM=PI*VOR/30.

WRITE(4,*)' OM=',OM,' WPL=',WPL,' DD=',DD,' RFIN=',RFIN,
& ' RPRINT=',RPRINT

B2=B2G*PI/PF

CKZ=WPL*SIN(B2)

CVR=0.

WVZ=WV*SIN(B2)

WVU=WV*COS(B2)

WRITE(4,*)' WV=',WV,' WVZ=',WVZ,' WVU=',WVU

DO 3 I=1,6

CKR(I)=.1+2*(I-1)

WRITE(4,*)' Радиальная скорость=',CKR(I)

NEQN=5

R=RST

RELERR=.6E-5

ABSERR=0.

IFLAG=1

ROUT=R

U=R*OM

CVU=WVU-U

CVUZ=WVZ/SIN(ATAN(WVZ/CVU))

NK=0

```

CKU=U-WPL*COS(B2)
CKUZ=WPL*SIN(B2)/SIN(ATAN(CKZ/CKU))
Y(1)=CKR(I)
Y(2)=CKU
Y(3)=CKUZ
Y(4)=0.
Y(5)=0.
1  CALL
RKF45(DROP,NEQN,Y,R,ROUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,I
WORK)
  CKR(I)=Y(1)
  CKU=Y(2)
  CKUZ=Y(3)
  C=SQRT(CKR(I)**2+CKU**2+CKZ**2)
  ALFA=CKZ/C*180/PI
  BETA=CKU/C*180/PI
  GAMMA=CKR(I)/C*180/PI
  WRITE(4,1000)C,ALFA,BETA,GAMMA
1000  FORMAT(' C,ALFA,BETA,GAMMA - ',F6.2,3F7.1)
  WRITE(4,1001)CKR(I),CKU,CKZ
1001  FORMAT('CKR,CKU,CKZ - ',3F6.2)
  U=R*OM
  CVU=WVU-U
  CVUZ=WVZ/SIN(ATAN(WVZ/CVU))
  PRINT*, I,R
  WRITE(4,*)' U=',U,' CVU=',CVU,' CVUZ=',CVUZ
  GOTO (70,2,20,30,40,50,60,70),IFLAG
2  ROUT=R+RPRINT
  NK=NK+1
  IF(NK.EQ.KI) WRITE(4,*) NK,R,Y
  IF(NK.EQ.KI) NK=0
  IF(R.LT.RFIN) GOTO 1
  GOTO 3
20  PRINT *,RELERR,ABSERR
  GOTO 1
30  PRINT*,' МНОГО ШАГОВ'
  GOTO 1
40  ABSERR=1E-7
  PRINT *,RELERR,ABSERR
  GOTO 1
50  RELERR=10.*RELERR
  PRINT *,RELERR,ABSERR

```



```

      IFLAG=2
      GOTO 1
60  PRINT*, 'МНОГО ДАННЫХ'
      IFLAG=2
      GOTO 1
70  PRINT *, 'НЕВЕРНЫЙ ВЫЗОВ'
      STOP
3   CONTINUE
      CLOSE(4)
      STOP
      END
      SUBROUTINE DROP(R,Y,YP)
      REAL Y(5),YP(5)
      COMMON CVR,CVU,CVUZ,DD,VISV,VV,VD
      R0(A,B)=A/B-1.
      RCX=CX(Y(1),Y(2),Y(3))
      YP(1)=Y(2)**2/(Y(1)*R)-RCX*R0(CVR,Y(1))
      YP(2)=-Y(2)/R+RCX*R0(CVU,Y(2))
      YP(3)=RCX*R0(CVR,Y(3))
      YP(4)=Y(2)/(Y(1)*R)
      Y(5)=Y(3)/Y(1)
      RETURN
      END
      FUNCTION CX(RCD,UCD,ZCD)
      COMMON CVR,CVU,CVUZ,DD,VISV,VV,VD
      DC=SQRT((CVR-RCD)**2+(CVU-UCD)**2+(CVUZ-ZCD)**2)
      RED=DC*DD/(VISV*VV)
      CX=0.45
      IF(RED.GE.1E-3.AND.RED.LE.6E3)
      CX=24./RED+4.4/SQRT(RED)+.32
      CX=.75*CX*VD/VV*DC/DD
      RETURN
      END
      SUBROUTINE
RKF45(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK,
& IWORK)
      EXTERNAL F
      INTEGER IWORK(5)
      REAL Y(NEQN),WORK(1)
      K1M=NEQN+1
      K1=K1M+1
      K2=K1+NEQN

```

```

      K3=K2+NEQN
      K4=K3+NEQN
      K5=K4+NEQN
      K6=K5+NEQN
      K7=K6+1
CALL
RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,WORK(1),
      &
WORK(K1M),WORK(K1),WORK(K2),WORK(K3),WORK(K4),WOR
K(K5),
      &
WORK(K6),WORK(K7),IWORK(1),IWORK(2),IWORK(3),IWORK(4),
      & IWORK(5))
RETURN
      END
      SUBROUTINE
RKFS(F,NEQN,Y,T,TOUT,RELERR,ABSERR,IFLAG,YP,H,F1,
      & F2,F3,F4,F5,SAVRE,SAVAE,NFE,KOP,INIT,JFLAG,KFLAG)
      LOGICAL HFAILD,OUTPUT
      REAL
Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),F3(NEQN),F4(NEQN),
      & F5(NEQN)
      EXTERNAL F
      DATA REMIN,MAXNFE/1E-12,3000/
      IF(NEQN.LT.1)GOTO 10
      IF((RELERR.LT.0.).OR.(ABSERR.LT.0.))GOTO 10
      MFLAG=IABS(IFLAG)
      IF(MFLAG.EQ.0.OR.MFLAG.GT.8)GOTO 10
      IF(MFLAG.NE.1)GOTO 20
      EPS=1.
5     EPS=EPS/2.
      EPSP1=EPS+1
      IF(EPSP1.GT.1.)GOTO 5
      U26=26*EPS
      GOTO 50
10    IFGLAG=8
      RETURN
20    IF(T.EQ.TOUT.AND.KFLAG.NE.3)GOTO 10
      IF(MFLAG.NE.2) GOTO 25
      IF(KFLAG.EQ.3.OR.INIT.EQ.0)GOTO 45
      IF(KFLAG.EQ.4)GOTO 40
      IF(KFLAG.EQ.5.AND.ABSERR.EQ.0.)GOTO 30

```

```
IF((KFLAG.EQ.6).AND.(RELERR.LE.SAVRE).AND.(ABSERR.LE.SA
VAE))
  & GOTO 30
  GOTO 50
25  IF(IFLAG.EQ.3)GOTO 45
    IF(IFLAG.EQ.4)GOTO 40
    IF(IFLAG.EQ.5.AND.ABSERR.GT.0.)GOTO 45
30  STOP
40  NFE=0
    IF(MFLAG.EQ.2)GOTO 50
45  IFLAG=JFLAG
    IF(KFLAG.EQ.3)MFLAG=IABS(IFLAG)
50  JFLAG=IFLAG
    KFLAG=0
    SAVRE=RELERR
    SAVAE=ABSERR
    RER=2.*EPS+REMIN
    IF(RELERR.GE.RER)GOTO 55
    RELERR=RER
    IFLAG=3
    KFLAG=3
    RETURN
55  DT=TOUT-T
    IF(MFLAG.EQ.1)GOTO 60
    IF(INIT.EQ.0)GOTO 65
    GOTO 80
60  INIT=0
    KOP=0
    A=T
    CALL F(A,Y,YP)
    NFE=1
    IF(T.NE.TOUT)GOTO 65
    IFLAG=2
    RETURN
65  INIT=1
    H=ABS(DT)
    TOLN=0.
    DO 70 K=1,NEQN
    TOL=RELERR*ABS(Y(K))+ABSERR
    IF(TOL.LE.0.)GOTO 70
    TOLN=TOL
```

```

      YPK=ABS(YP(K))
      IF(YPK*H**5.GT.TOL) H=(TOL/YPK)**.2
70   CONTINUE
      IF(TOLN.LE.0.)H=0.
      H=AMAX1(H,U26*AMAX1(ABS(T),ABS(DT)))
      JFLAG=ISIGN(2,IFLAG)
80   H=SIGN(H,DT)
      IF(ABS(H).GE.2.*ABS(DT))KOP=KOP+1
      IF(KOP.NE.100)GOTO 85
      KOP=0
      IFLAG=7
      RETURN
85   IF(ABS(DT).GT.U26*ABS(T))GOTO 95
      DO 90 KK=1,NEQN
90   Y(KK)=Y(KK)+DT*YP(KK)
      A=TOUT
      CALL F(A,Y,YP)
      NFE=NFE+1
      GOTO 300
95   OUTPUT=.FALSE.
      SCALE=2./RELERR
      AE=SCALE*ABSERR
100  HFAILD=.FALSE.
      HMIN=U26*ABS(T)
      DT=TOUT-T
      IF(ABS(DT).GE.2.*ABS(H))GOTO 200
      IF(ABS(DT).GT.ABS(H))GOTO 150
      OUTPUT=.TRUE.
      H=DT
      GOTO 200
150  H=.5*DT
200  IF(NFE.LE.MAXNFE)GOTO 220
      IFLAG=4
      KFLAG=4
      RETURN
220  CALL FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,F1)
      NFE=NFE+5
      EEOET=0.
      DO 250 K=1,NEQN
      ET=ABS(Y(K))+ABS(F1(K))+AE
      IF(ET.GT.0.)GOTO 240
      IFLAG=5

```

```

RETURN
240  EE=ABS((-2090.*YP(K)+(21970.*F3(K)-15048.*F4(K)))+
    & (22528.*F2(K)-27360.*F5(K)))
250  EEOET=AMAX1(EEOET,EE/ET)
    ESTTOL=ABS(H)*EEOET*SCALE/752400.
    IF(ESTTOL.LE.1.)GOTO 260
    HFAILD=.TRUE.
    OUTPUT=.FALSE.
    S=.1
    IF(ESTTOL.LT.59049.)S=.9/ESTTOL**.2
    H=S*H
    IF(ABS(H).GT.HMIN)GOTO 200
    IFLAG=6
    KFLAG=6
    RETURN
260  T=T+H
    DO 270 K=1,NEQN
270  Y(K)=F1(K)
    A=T
    CALL F(A,Y,YP)
    NFE=NFE+1
    S=5.
    IF(ESTTOL.GT.1.889568E-4)S=.9/ESTTOL**.2
    IF(HFAILD) S=AMIN1(S,1.)
    H=SIGN(AMAX1(S*ABS(H),HMIN),H)
    IF(OUTPUT)GOTO 300
    IF(IFLAG.GT.0)GOTO 100
    IFLAG=-2
    RETURN
300  T=TOUT
    IFLAG=2
    RETURN
END
SUBROUTINE FEHL(F,NEQN,Y,T,H,YP,F1,F2,F3,F4,F5,S)
REAL
Y(NEQN),YP(NEQN),F1(NEQN),F2(NEQN),F3(NEQN),F4(NEQN),
    & F5(NEQN),S(NEQN)
    CH=H/4.
    DO 221 K=1,NEQN
221  F5(K)=Y(K)+CH*YP(K)
    CALL F(T+CH,F5,F1)
    CH=3.*H/32.

```

```

DO 222 K=1,NEQN
222  F5(K)=Y(K)+CH*(YP(K)+3.*F1(K))
      CALL F(T+3.*H/8.,F5,F2)
      CH=H/2197.
DO 223 K=1,NEQN
223  F5(K)=Y(K)+CH*(1932.*YP(K)+(7296.*F2(K)-7200.*F1(K)))
      CALL F(T+12.*H/13.,F5,F3)
      CH=H/4104.
DO 224 K=1,NEQN
224  F5(K)=Y(K)+CH*((8341.*YP(K)-845.0*F3(K))+(29440.*F2(K)-
32832.
      & *F1(K)))
      CALL F(T+H,F5,F4)
      CH=H/20520.
DO 225 K=1,NEQN
225  F1(K)=Y(K)+CH*((-6080.*YP(K)+(9295.*F3(K)-
5643.*F4(K)))+(41040.
      & *F1(K)-28352.*F2(K)))
      CALL F(T+H/2.,F1,F5)
      CH=H/7618050.
DO 230 K=1,NEQN
230  S(K)=Y(K)+CH*((902880.*YP(K)+(3855735.*F3(K)-
1371249.*F4(K)))
      & +(3953664.*F2(K)+277020.*F5(K)))
      RETURN
      END

```

Файл данных MD.DAT

0.12 0.16 32.

RST RFIN B2G

Файл данных MD1.DAT

2.E-5 6.666E-3 1

DD RPRINT KI

Файл данных TUR_DR.DAT

3800.0 33.628430 112.170300 1.197000E-05

1.741103 1.037506E-03

PROGRAM RK1_GPT

C Программа позволяет выполнить расчет

C движения жидкостного элемента по перу рабочей

- С лопатки ГПТ-100 в радиальном направлении под
 С действием инерционных сил

Идентификаторы программы RK1_GPT

OMGA - угловая скорость

U – окружная скорость

WU – проекция относительной скорости жидкостного элемента на ось U

LBFI – длина корыта лопатки

TAUF – время движения жидкостного элемента по корыту лопатки

WR - проекция скорости жидкостного элемента на ось R

RSR – средний радиус рабочего колеса

OB – число оборотов рабочего колеса в минуту

```

DIMENSION B(10),C(10)
REAL IVTV,ISM, LAMV,LAM,IV,LBFI
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.))+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.))-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.))+1.98E-2*(A-273.)**2
VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.))+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.))+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.))-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.))+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.))+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
LAML(A)=0.57225+1.92E-3*(A-273.))-8.1E-6*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.))+1.314e-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950-799.5*(A-273.))+1.502*(A-273.)**2
ROP(A)=6.7962-0.129299*(A-273.))+6.7314e-4*(A-273.)**2
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/
& A-11.48776*ALOG(A))
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.))-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='RK1.DAT')
OPEN (8,FILE='REZRK.DAT')
READ(2,*)
N,TAU0,DTAU,WU,OB,RSR,LBFI,WR0,UGC,AMV,PI,KK
GCA=UGC/AMV
OMGA=PI*OB/30.
U=OMGA*RSR
TAUF=LBFI/WU
N=2
IS=0

```

```

WR=WR0
H=RSR
TAU=TAU0
B(1)=H
B(2)=WR
J=0
K=0
120  TAU=TAU+DTAU
      K=K+1
      DO 110 LL=1,4
      C(1)=WR
      C(2)=OMGA**2*H+2.*OMGA*WU+WU**2/H
      CALL RKM(TAU,DTAU,N,IS,B,C)
      H=B(1)
110  WR=B(2)
      DH=H-RSR
      IF(K.EQ.KK) THEN
      PRINT *, " TAU=",TAU," WR=",WR," H=",H
      K=0
      J=J+1
      IF(J.EQ.10) THEN
      J=0
          ENDIF
      END IF
      WRITE(8,*) ' TAU=',TAU,' WR=',WR,' H=',H , ' DH=',DH,
& ' TAUF=',TAUF,' OMGA=',OMGA,' C(1)=',C(1),' C(2)=',C(2)
      IF(TAU.LT.TAUF) GOTO 120
      STOP
      END

```

Файл данных RK1.DAT

```

2  0.0  0.05E-3  33.  3800  0.14  26.3E-3  0.0  8314.  18.  3.1416  10
N TAU0 DTAU WU  OB  RSR LBF1  WR0 UGC MV  PI  KK

```

PROGRAM RK_GPT

С Движение капли в относительной системе координат

Идентификаторы программы RK1_GPT

VD – объем капли

ROD – плотность капли

GD – масса капли

ALFR1 – угол (в радианах) между вектором абсолютной скорости пара на входе в лопатку и вектором окружной скорости

BETR1 – угол (в радианах) между вектором относительной скорости пара на входе в лопатку и вектором окружной скорости
 CV1 – абсолютная скорость пара на входе в рабочий канал
 WV1 – относительная пара на входе в рабочий канал
 CVU1 – проекция абсолютной скорости пара на ось U
 CVZ1 – проекция абсолютной скорости пара на ось Z
 USR – переносная скорость на среднем радиусе колеса
 WVU1 – проекция относительной скорости пара на ось U на входе в рабочий канал
 GVK – расход пара через рабочий канал
 ZB – число рабочих каналов
 WDR, WDW, WDU – проекции скорости капли на оси координат
 WVR, WVZ, WVU – то же для пара
 DD – диаметр капли
 RED – число Рейнольдса, определяемое по модулю разности скоростей пара и капли и диаметру капли

```

DIMENSION B(10),C(10)
REAL IVTV,ISM, LAMV,LAM,IV
YILTL(A)=(12.475+3.935*(A-273.))+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
IV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4331.-3.09*(A-273.))+1.98E-2*(A-273.)**2
VISL(A)=(613.-4.227*(A-273.))+9.22E-3*(A-273.)**2)*1.E-6
VISP(A)=(8.35+3.42E-2*(A-273.))+2.E-5*(A-273.)**2)*1.E-6
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
PR(A)=1.28-4.4E-3*(A-273.))+2.4E-5*(A-273.)**2
LAM(A)=(1.801+2.69E-3*(A-273.))+3.02E-5*(A-273.)**2)*1.E-2
LAML(A)=0.57225+1.92E-3*(A-273.)-8.1E-6*(A-273.)**2
CVL(A)=4244.1-1.583*(A-273.))+1.314e-2*(A-273.)**2
CVV(A)=135950-799.5*(A-273.))+1.502*(A-273.)**2
ROP(A)=6.7962-0.129299*(A-273.))+6.7314e-4*(A-273.)**2
PS(A)=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*A-7821.541/
& A-11.48776*ALOG(A))
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
OPEN (2,FILE='RK.DAT')
OPEN (8,FILE='REZRK.DAT')
READ(2,*) N,DFIG,RV,RN,TV,TD,DD,WDR0,WDU0,WDZ0,
&
WVR0,WVU0,WVZ0,CV1,ALFG1,BETG1,ZB,OB,UGC,AMV,PI,KK
GCA=UGC/AMV
VD=PI*DD**3/6.
  
```

```

ROD=RO(TD)
GD=PI*DD**3*ROD/6.
OMGA=PI*OB/30.
ALFR1=ALFG1*PI/180.
BETR1=BETG1*PI/180.
CVU1=CV1*COS(ALFR1)
CVZ1=CV1*SIN(ALFR1)
RSR=(RN+RV)/2.
USR=OMGA*RSR
WVU1=CVU1-USR
WV1=CVZ1/SIN(BETR1)
GVK=PI*(RN**2-RV**2)*CV1*SIN(ALFR1)*ROP(TV)/ZB
GVGPT=GVK*ZB
N=3
IS=0
WDR=WDR0
WDU=WDU0
WDZ=WDZ0
WVR=WVR0
WVU=WDU+15.
WVZ=WDZ+15.
B(1)=WDR
B(2)=WDU
B(3)=WDZ
J=0
K=0
FIR=0
R=RV
WRITE(8,*)' R Z FIG WDR WDU WDZ C(1) C(2) C(3) RED CX
DW WD WV1'
DFIR=DFIG*PI/180.
120  FIR=FIR+DFIR
K=K+1
DO 110 LL=1,4
ROD=RO(TD)
ROV=ROP(TV)
VISV=VISP(TV)
PV=PS(TV)
DR=WDR*R*DFIR/WDU
R=R+DR
DW=((WVR-WDR)**2+(WVU-WDU)**2+(WVZ-
WDZ)**2)**0.5

```

```

WD=(WDR**2+WDU**2+WDZ**2)**0.5
RED=DW*DD*ROV/VISV
IF(RED.GT.0.AND.RED.LE.1.)CX=24./RED
IF(RED.GT.1.AND.RED.LE.390.)CX=24./(RED**.667)
IF(RED.GT.390.)CX=.45
VD=PI*DD**3/6.

C(1)=(OMGA*R)**2/WDU+2.*OMGA*R+WDU+3.*CX*ROV*DW*
& R*(WVR-WDR)/4./ROD/DD/WDU
C(2)=-2.*OMGA*R*WDR/WDU-WDR+3.*CX*ROV*(WVU-
WDU)*
& DW*R/4./ROD/DD/WDU
C(3)=3.*CX*ROV*(WVZ-WDZ)*DW*R/4./ROD/DD/WDU
CALL RKM(FIR,DFIR,N,IS,B,C)
WDR=B(1)
WDU=B(2)
110  WDZ=B(3)
DZ=ABS(WDZ/WDR*DR)
Z=Z+DZ
FIG=FIR*180./PI
IF(K.EQ.KK) THEN
PRINT *, " Z=",Z," GVK=",GVK," ALFG1=",ALFG1
WRITE(8,200)
R,Z,FIG,WDR,WDU,WDZ,C(1),C(2),C(3),RED,CX,DW,WD,
& WV1
K=0
J=J+1
IF(J.EQ.10) THEN
WRITE(8,*)' R Z FIG WDR WDU WDZ C(1) C(2) C(3) RED CX
DW WD
& WV1'
J=0
ENDIF
END IF
IF(R.LT.RN) GOTO 120
200  FORMAT(2F8.5,13E10.2)
STOP
END

Файл данных RK.DAT
3 0.1 0.120 0.160 373. 373. 2.E-5 5. 60. 10.
0.0 70. 15. 155. 18. 32. 65. 5600. 8314. 18. 3.1416 10
N DFIG RV RN TV TD DD WDR WDU WDZ

```

WVR WVU0 WVZ CV1 ALFG1 BETG1 ZB OB UGC AMV PI
 KK

PROGRAM DROP_3D

' Расчет движения капель в рабочем канале ГПТ.

Идентификаторы программы

DD – диаметр капли

VD – объем капли

ROD – плотность капли

GD – масса капли

ROV – плотность пара

ALFR1 – угол (в радианах) между вектором абсолютной скорости пара на входе в лопатку и вектором окружной скорости

BETR1 – угол (в радианах) между вектором относительной скорости пара на входе в лопатку и вектором окружной скорости

CV1 – абсолютная скорость пара на входе в рабочий канал

WV1 – относительная скорость пара на входе в рабочий канал

CVU1 – проекция абсолютной скорости пара на ось U

CVZ1 – проекция абсолютной скорости пара на ось Z

USR – переносная скорость на среднем радиусе колеса

WVU1 – проекция относительной скорости пара на ось U на входе в рабочий канал

GVK – расход пара через рабочий канал

ZB – число рабочих каналов

WD - относительная скорости капли

WDR, WDZ, WDU – проекции скорости капли на оси координат

WVR, WVZ, WVU – то же для пара

RED – число Рейнольдса, определяемое по модулю разности скоростей пара и капли и диаметру капли

OMGA - угловая скорость

U – окружная скорость

WU – проекция относительной скорости жидкостного элемента на ось U

OB – число оборотов рабочего колеса в минуту

A1 - коэффициент в формуле для трения капли о стенку

Gкар - расход капель через канал

TV – температура пара

TD – температура капли

screen 12

shared nl,pi,b1,b2,beta1,fi1,fi2,hor,dsr,wv1,wvu,wvz,wvr,_
 rkor,fall,cosfi,sinfi,Rstart,zona,fi

```

shared u0,z0,f()
dim static f(15)
dim b(15),c(15)
pi=3.141592
open "i",1,"input.dat"
input#1,nl,o$
input#1,rv,o$
rv=rv/1000
input#1,rn,o$
rn=rn/1000
input#1,bt,o$
t=(rv+rn)*pi/nl
hor=t*bt*1000
input#1,beta1,o$
input#1,beta2,o$
input#1,fi1,o$
input#1,dh,o$
close#1
locate 28,10
input "Стартовая позиция (расст. от корня лопатки в мм) : ",Rstart
fi2=180-fi1-beta1-beta2
beta1=beta1+alfa
beta2=beta2-alfa
b1=beta1/180*pi
b2=beta2/180*pi
f1=(fi1+beta1)/180*pi
f2=(fi2+fi1+beta1)/180*pi
'h=rn-rv
  OPEN "i",2,"drop_3d.DAT"
  OPEN "o",8,"RKout.DAT"
  OPEN "o",9,"Wzu.DAT"
  OPEN "o",10,"Wvap.DAT"
  input#2, DZ,TV,TD,WD,CV1,OB,UGC,AMV
d$=command$ : dd=val(d$)*1e-6
  GCA=UGC/AMV
  VD=PI*DD^3/6.
  ROD=RO(TD)
  GD=PI*DD^3*ROD/6.
  OMGA=PI*OB/30.
  alfr1=18*pi/180
  CVU1=CV1*COS(alfr1)
  CVZ1=CV1*SIN(alfr1)

```

```

RSR=(RN+RV)/2.
WVU1=CVU1-OMGA*RSR
b1=32/180*pi
WV1=CVZ1/SIN(b1)
GVK=PI*(RN^2-RV^2)*CV1*SIN(b1)*ROP(TV)/NL
GVGPT=GVK*NL
N=3
Ik=0
WDR=0 : WDU=WD*cos(b1) : WDZ=WD*sin(b1)
WVR=0 : WVU=WV1*cos(b1) : WVZ=WV1*sin(b1)
B(1)=WDZ
B(2)=WDR
B(3)=WDU
wall=0
R=RV+Rstart/1000
  print#8, " Z R U "
  print#8,"dd=";dd*1E6;" МК"
  print#10, " зона WVR WVZ WVU "
  print#9," wall Z R-RV U UKK WDR WDZ WDU
WD"
  ZZ=0 : U=0 : M=0
120 ZZ=ZZ+DZ
  A=ZZ
  ROD=RO(TD)
  ROV=ROP(TV)
  VISV=VISP(TV)
  PV=PS(TV)
  call wvap(r*1000,u*1000,zz*1000)
  for LL=1 to 4
  ' call wvap(r*1000,u*1000,zz*1000)
  DW=((WVR-WDR)^2+(WVU-WDU)^2+(WVZ-WDZ)^2)^0.5
  WD=(WDR^2+WDU^2+WDZ^2)^0.5
  RED=DW*DD*ROV/VISV
  REDW=WD*DD*ROV/VISV
  KCX=3/4*CXX(RED)*ROV/ROD*DW/DD
  A1=10
  KCW=A1*3/4*CXX(REDW)*ROV/ROD*WD/DD
  if wall=0 then 'полет
  C(1)= KCX*(WVZ-WDZ)/WDZ
  C(2)=( OMGA^2*R+ 2*OMGA*WDU+ WDU^2/R+ KCX*(WVR-
WDR) )/ WDZ

```

```

      C(3)=( -2*OMGA*WDR- WDU*WDR/R+ KCX*(WVU-WDU) )/
WDZ
      end if
      if wall=1 then 'корыто
      C(1)= KCX*(WVZ-WDZ)/WDZ-KCW*WDZ/WDZ
      C(2)=( OMGA^2*R+ 2*OMGA*WDU+ WDU^2/R+ KCX*(WVR-
WDR) )/WDZ-KCW*WDR/WDZ
      C(3)=0
      'C(3)=( -2*OMGA*WDR- WDU*WDR/R+ KCX*(WVU-WDU)
)/ WDZ-KCW*WDR/WDZ
      end if
      if wall=2 then 'бандаж
      C(1)= KCX*(WVZ-WDZ)/WDZ-KCW*WDZ/WDZ
      WDR=0
      C(2)=0
      C(3)=( -2*OMGA*WDR- WDU*WDR/R+ KCX*(WVU-WDU) )/
WDZ-KCW*WDR/WDZ
      end if
      if wall=3 then 'бандаж+корыто
      C(1)= KCX*(WVZ-WDZ)/WDZ-KCW*WDZ/WDZ
      WDR=0
      C(2)=0
      C(3)=0
      end if

      CALL RKM (A,DZ,3,Ik,B(),C())
next ll
      select case wall
case 0 'полет в канале
      WDZ=B(1)
      WDR=B(2)
      WDU=B(3)
      R=R+WDR/WDZ*DZ
      U=U+WDU/WDZ*DZ
case 1 ' движение по корыту
      WDZ=B(1)
      WDR=B(2)
      R=R+WDR/WDZ*DZ
      Uf=ukk(r*1000,zz*1000)/1000
      Rf=R
      Zf=zz
      call wvap(rf*1000,uf*1000,zf*1000)

```

```

AA=cos(pi/nl) : BB=cos(pi/2+fi) : CC=sin(pi/2+fi)
'синус угла между вектором скорости и пов-стью
sinski=abs(AA*WDR+BB*WDZ+CC*WDU)/_
( sqrt(AA^2+BB^2+CC^2)*sqrt(WDR^2+WDZ^2+WDU^2) )
cosksi=sqrt(1-sinski^2)
WD=(WDR^2+WDU^2+WDZ^2)^0.5
WDtau=WD*cosksi
WDU=WDtau*cos(fi)
U=ukk(r*1000,zz*1000)/1000
case 2 ' движение по бандажу
  WDZ=B(1)
  WDR=0
  WDU=B(3)
  U=U+WDU/WDZ*DZ
case 3 ' движение по стыку бандажа и корыта
  WDZ=B(1)
  WDR=0
  Uf=ukk(r*1000,zz*1000)/1000
  Rf=R
  Zf=zz
  call wvap(rf*1000,uf*1000,zf*1000)
  AA=cos(pi/nl) : BB=cos(pi/2+fi) : CC=sin(pi/2+fi)
  'синус угла между вектором скорости и пов-стью
  sinksi=abs(AA*WDR+BB*WDZ+CC*WDU)/_
  ( sqrt(AA^2+BB^2+CC^2)*sqrt(WDR^2+WDZ^2+WDU^2) )
  cosksi=sqrt(1-sinksi^2)
  WD=(WDR^2+WDU^2+WDZ^2)^0.5
  WDtau=WD*cosksi
  WDU=WDtau*cos(fi)
  U=ukk(r*1000,zz*1000)/1000

end select 'wall
  if r>=rn and u*1000<ukk(r*1000,zz*1000) and wall=0 then
    wall=2 : print#9, " выпала наверх" ' выпала наверх
    goto cont
  end if
  if r>=rn and wall=1 then
    wall=3 :print#9, "выпала на стык" 'выпала на стык бандажа и
корыта
    goto cont
  end if
  if wall=2 and u*1000>=ukk(r*1000,zz*1000) then

```



```

wall=3 :print#9, "выпала на стык" 'выпала на стык банджа и
корыта
goto cont
end if
if wall=0 and u*1000>=ukk(r*1000,zz*1000) then
print #9," выпала на корыто"
wall=1
end if
cont:
IF zz*1000<=hor then
print#8,using"##.### "; ZZ*1000,(R-RV)*1000,U*1000
print#9, wall;" ";
print#9,using"+###.# "; ZZ*1000,(R-
RV)*1000,U*1000,ukk(r*1000,zz*1000),WDR,WDZ,WDU,WD
'
print "zz>hor:";zz;">";hor
goto 120
else
goto ext
end if
ext:
close
STOP

```

```
function cxx(Re)
```

```
IF RE>=0. AND RE<=1. then CXX=24./RE
```

```
IF RE>=1. AND RE<=390. THEN CXX=24./(RE^0.667)
```

```
IF RE>390. THEN CXX=0.45
```

```
end function
```

```
function ukk(r,z)
```

```
t=r*2*pi/nl
```

```
bk=t*sin(b1) 'ширина канала
```

```
f1=(fi1+beta1)/180*pi
```

```
f2=(fi2+fi1+beta1)/180*pi
```

```
r3=(hor+bk*(cos(b1)+cos(f1)))/(cos(b1)+cos(b2))
```

```
r1=r3-bk
```

```
r4=r1
```

```
r2=r4-bk
```

```
'разбивка на зоны по z
```

```
z1=bk*cos(b1)
```

```
z2=r3*(cos(b1)-cos(f1))
```

```
z3=r3*cos(b1)-r1*cos(f1)
```

$$z4=hor-bk*\cos(b2)$$

$$z5=hor$$

```
'координаты центров окружностей
z8=r3*cos(b1) : u8=t-r3*sin(b1)
z9=hor-r4*cos(b2) : u9=u8+(r3-r4)*sin(f1)
  select case z
case 0 to z1
  ukk=sqr(r3^2-(z-z8)^2)+u8
case z1 to z2
  ukk=sqr(r3^2-(z-z8)^2)+u8
case z2 to z3
  ukk=sqr(r4^2-(z-z9)^2)+u9
case z3 to z4
  ukk=sqr(r4^2-(z-z9)^2)+u9
case z4 to hor
  ukk=sqr(r4^2-(z-z9)^2)+u9
  end select
end function
```

```
sub wvar(r,u,z) 'скорость пара
t=r*2*pi/nl
bk=t*sin(b1) 'ширина канала
  f1=(fi1+beta1)/180*pi
  f2=(fi2+fi1+beta1)/180*pi
r3=(hor+bk*(cos(b1)+cos(f1)))/(cos(b1)+cos(b2))
r1=r3-bk
r4=r1
r2=r4-bk
'разбивка на зоны по z
z1=bk*cos(b1)
z2=r3*(cos(b1)-cos(f1))
z3=r3*cos(b1)-r1*cos(f1)
z4=hor-bk*cos(b2)
z5=hor
'координаты центров окружностей
z8=r3*cos(b1) : u8=t-r3*sin(b1)
z9=hor-r4*cos(b2) : u9=u8+(r3-r4)*sin(f1)
'уравнения лучей b,c,d
'определение зоны (1-4)
  select case z
case 0 to z1
```

```

ub=t-z*atn(b1)
if u<=ub then zona=1
if u>ub then zona=2
case z1+dz to z2
zona=2
case z2+dz to z3
uc=u9+r4*sin(f1)-(z-z2)*atn(f1)
if u<=uc then zona=2
if u>uc then zona=3
case z3+dz to z4
zona=3
case z4+dz to hor
ud=u9+r2*sin(b2)+(z-z4)*atn(b2)
if u>=ud then zona=3
if u<ud then zona=4
end select
select case zona
case 1:WVR=0: WVU=WV1*cos(b1) : WVZ=WV1*sin(b1)
rkor=1e5
fi=b1
case 2
a0=WV1*(r3-r1)/log(r3/r1)
rt=sqr((z-z8)^2+(u-u8)^2): WVM=a0/rt
fi=atn((u-u8)/(z8-z))
WVR=0
wvu=wvm*cos(fi) : wvz=wvm*sin(fi)
u0=u8: z0=z8: rkor=r3
case 3
a0=WV1*(r4-r2)/log(r4/r2)
rt=sqr((z-z9)^2+(u-u9)^2): WVM=a0/rt
WVR=0
select case z
case <z9: fi=atn((u-u9)/(z9-z))
case z9 : fi=1.57
case >z9: fi=1.57+atn((z-z9)/(u-u9))
end select
wvu=wvm*cos(fi) : wvz=wvm*sin(fi)
u0=u9: z0=z9 : rkor=r4
case 4: WVR=0:
WVU=-WV1*cos(b2)
WVZ=WV1*sin(b2)
rkor=1e5

```

```

fi=pi-b2
end select
print#10,zona,wvz,wvu,sqr(wvz^2+wvu^2),fi/3.14*180
end sub
FUNCTION RO(H)
RO=999.9-0.1475*(H-273.)-2.695E-3*(H-273.)^2 '+'
END FUNCTION
function ROP(H)
ROP=6.7962-0.129299*(H-273.)+6.7314e-4*(H-273.)^2
end function
function ps(H)
PS=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*H-7821.541/H-
11.48776*LOG(H))
end function
function visp(H)
VISP=(8.35+3.42E-2*(H-273.)+2.E-5*(H-273.)^2)*1.E-6
end function
FUNCTION VI(H)
IV=(2461.1+2.636*(H-273.)-4.88E-3*(H-273.)^2)*1.E3 '+'
END FUNCTION
FUNCTION VISL(H)
VISL=(613.-4.227*(H-273.)+9.22E-3*(H-273.)^2)*1.E-6 '+'
END FUNCTION
FUNCTION YIL(H)
YIL=(12.475+3.935*(H-273.)+1.3125E-3*(H-273.)^2)*1.E3
END FUNCTION
FUNCTION CP(H)
CP=4331.-3.09*(H-273.)+1.98E-2*(H-273.)^2
END FUNCTION
FUNCTION CPL(H)
CPL=4275.5-1.2209*(H-273.)+0.59823E-2*(H-273.)^2
END FUNCTION
FUNCTION CPLS(H)
CPLS=(CP(TW0)+CP(H))/2.
END FUNCTION
FUNCTION CPDS(H)
CPDS=(CP(TD0)+CP(H))/2.
END FUNCTION
FUNCTION YIV(H)
YIV=(2461.1+2.636*(H-273.)-4.88E-3*(H-273.)^2)*1.E3
END FUNCTION
FUNCTION SIG(H)

```

```
SIG=(75.54-0.168*(H-273.))*1.E-3
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION VIS(H)
```

```
VIS=(613.-4.227*(H-273.)+9.22E-3*(H-273.)^2)*1.E-6
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION SQV(H)
```

```
SQV=(2447.7-1.283*(H-273.)-6.26E-3*(H-273.)^2)*1.E3
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION PP(H)
```

```
PP=1.E6*EXP(82.86568+0.01028003*H-7821.541/H-  
11.48776*LOG(H))
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION YIW(H)
```

```
YIW=(12.475+3.935*(H-273.)+1.3125E-3*(H-273.)^2)*1.E3
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION PR(H)
```

```
PR=1.28-4.4E-3*(H-273.)+2.4E-5*(H-273.)^2
```

```
END FUNCTION
```

```
FUNCTION LAM(H)
```

```
LAM=(1.801+2.69E-3*(H-273.)+3.02E-5*(H-273.)^2)*1.E-2
```

```
END FUNCTION
```

```
*****
```

```
SUB RKM(A,DX,N,Ik,B(),C())
```

```
' DIM F(15),GG(60)
```

```
  DIM GG(60)
```

```
  Ik=Ik+1
```

```
  ON Ik GOTO 10,30,60,80
```

```
10  for I=1 to N
```

```
  F(I)=B(I)
```

```
  GG(4*I-3)=C(I)*DX
```

```
  B(I)=F(I)+GG(4*I-3)/2.
```

```
  next
```

```
  A=A+DX/2
```

```
  GOTO 100
```

```
30  for I=1 to N
```

```
  GG(4*I-2)=C(I)*DX
```

```
  B(I)=F(I)+GG(4*I-2)/2.
```

```
  next
```

```
  GOTO 100
```

```
60  for I=1 to N
```

```
  GG(4*I-1)=C(I)*DX
```

```
  B(I)=F(I)+GG(4*I-1)
```

```

next
A=A+DX/2
GOTO 100
80  for I=1 to N
    GG(4*I)=C(I)*DX
    B(I)=GG(4*I-3)+2.*(GG(4*I-2)+GG(4*I-1))
    B(I)=(B(I)+GG(4*I))/6.+F(I)
next
ik=0
100  abb=0
end sub 'RKM
'*****
Файл данных DROP_3D.DAT
65,  " число лопаток "
120, " D1 - внутр. радиус. колеса (мм)"
160, " D2 - наружн. радиус. колеса (мм)"
1.7, " bt - отношение хорда/шаг "
32,  " beta1 - угол входа (град)"
32,  " beta2 - угол выхода (град)"
42,  " fi1 - угол смены радиусов лопатки"
1,   " dd - шаг при вычерчивании лопатки (мм)"
0.5E-4 411.57 415.53 72  160  3800. 8314. 18. 0.5 0.167 2.E-5
DZ  TV  TD  WD  CV1  OB  UGC  AMV  A1  Gkap  DD

PROGRAM CON_STREAM
C  Конденсация паровой струи в спутном потоке
C  холодной воды.
DIMENSION B(10),C(10)
REAL IV,ILTL1,ID,ISTU,LAMV,ISTV1,ISTV,ISTL,MAX,KN
VIS(A)=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)**2)*1E-6
RO(A)=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)**2
YIL(A)=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)**2)*1.E3
SIG(A)=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3
SQV(A)=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)**2)*1.E3
CPL(A)=4275.5-1.2209*(A-273.)+0.59823E-2*(A-273.)**2
YIV(A)=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)**2)*1.E3
OPEN (2,FILE='CON_ST.DAT')
OPEN (6,FILE='CON')
OPEN (8,FILE='REZCON_ST.DAT')
READ(2,*) N,DX,GV1,PV1,GL1,TL1,PL1,DNL1,
& DN1,ZNC,UGC,AMV,PI,KK
Z=ZNC

```

```

FN1=PI*DN1**2/4.
FNL1=PI*DN1**2/4.-PI*DN1**2/4.
ROL1=RO(TL1)
CL1=GL1/ROL1/FNL1
ILT1=YIL(TL1)*GL1
TV1=5.677*PV1**0.25+273.
ROV1=1.213E-5*PV1**0.9375
CV1=GV1/ROV1/FN1
FV1=GV1/ROV1/CV1
ISTV1=GV1*(YIV(TV1)+CV1**2/2.)
YISTV1=(YIV(TV1)+CV1**2/2.)
PV=PV1
CV=CV1
GV=GV1
FN=FN1
DN=DN1
TV=TV1
TVR=TV1
CL=CL1
TL=TL1
PL=PL1
ROL=RO(TL1)
VISV1=(8.35+3.42E-2*(TV1-273.)+2E-5*(TV1-273.)**2)*1E-6
REV=CV1*DN1*ROV1/VISV1
CP=CPL(TL1)
KN=SQV(TV1)/CP/(TV1-TL1)
CPV=2.E3
PRV=1.28-4.4E-3*(TV1-273.)+2.4E-5*(TV1-273.)**2
H=(0.352E-*REV**0.4*KN**0.08*PRV*CP/CPV)**1.67*DN1
COSB=1./((DN1/2./H)**2+1.)**0.5
COSG=COS(PI/2.-COSB)
DN=DN1*(H-X)/H
FN=PI*DN**2/4.
GV=CV*ROV*FN
ALFA=2.*GV1*SQV(TV1)*COSB/PI/DN1/H/(TV1-TL1)
PRGV=ALFA*(TV-TL)*PI*DN/SQV(TV)/COSB
DLGV=GV1-GV
PRFN=-PI*(DN1-DN1*X/H)*DN1/H/2.
PRINT*, ' PV=',PV, ' CV=',CV, ' FN=',FN, ' GV=',GV, ' DN=',DN,
& ' ALFA=',ALFA, ' TL1=',TL1, ' PL1=',PL1, ' TV=',TV, ' H=',H
WRITE(6,*) ' X=',X, ' PV=',PV, ' CV=',CV, ' FN=',FN, ' GV=',GV,
& ' DN=',DN,

```

```

& 'ROL=',ROL,' TL1=',TL1,' PL1=',PL1,' TV=',TV
N=6
IS=0
B(1)=PV
B(2)=CV
B(3)=TVR
B(4)=CL
B(5)=TL
B(6)=PL
K=0
X=0
140 X=X+DX
K=K+1
IF(X.GT.Z)GOTO 16
DO 150 LL=1,4
ROV=1.213E-5*PV**.9375
TV=5.677*PV**.25+273.
SQ=SQV(TV)
VISV1=(8.35+3.42E-2*(TV1-273.))+2E-5*(TV1-273.)**2)*1E-6
REV=CV1*DN1*ROV1/VISV1
CP=CPL(TL1)
KN=SQV(TV1)/CP/(TV1-TL1)
PRV=1.28-4.4E-3*(TV1-273.))+2.4E-5*(TV1-273.)**2
H=(0.352E-2*REV**0.4*KN**0.08*PRV*CP/CPV)**1.67*DN1
COSB=1./((DN1/2./H)**2+1.))**0.5
COSG=COS(PI/2.-COSB)
DN=DN1*(H-X)/H
FN=PI*DN**2/4.
FNL=PI*DNL1**2/4.-PI*DN**2/4.
GV=CV*ROV*FN
ALFA=2.*GV1*SQV(TV1)*COSB/PI/DN1/H/(TV1-TL1)
PRGV=ALFA*(TV-TL)*PI*DN/SQV(TV)/COSB
DLGV=GV1-GV
GL=GL1+DLGV
PRFN=-PI*(DN1-DN1*X/H)*DN1/H/2.
PRFNL=PI*(DN1-DN1*X/H)*DN1/H/2.
J=ALFA*(TV-TL)/SQ
LAMV=(1.801+2.69E-3*(TV-273.))+3.02E-5*(TV-273.)**2)*1.E-2
PPROV=8.805129E4*PV**62.5E-3
GCV=UGC/AMV
FNL=PI*(DNL1**2-DN**2)/4.
PVTL=((TL-273.)/5.667)**4

```



```

IV=YIV(TV)
  ISTV=(IV+CV**2/2.)
U=ALFA*(TV-TL)/ROV/SQ
ISTU=(IV+U**2/2.)
CPV=2.E3
  ADK=1.135
  MAX=CV/(ADK*TV*GCV)**0.5
  ISTL=YIL(TL)+CL**2/2.
C(1)=ROV*CV*(((U*COSG+CV)/GV+1./ROV/FN)*PRGV-
CV*PRFN/FN)/
  & (MAX**2-1.)
C(2)=PRGV/ROV/FN-CV*PRFN/FN-MAX**2*C(1)/ROV/CV
C  C(2)=-((U*COSG+CV)*PRGV/GV-C(1)/ROV/CV
C(3)=-((ISTV-ISTU)*PRGV/GV+CV*C(2))/CPV
  C(4)=((CV-CL)*PRGV-FNL*C(6))/GL
  C(5)=((ISTV-ISTL)*PRGV/GL-CL*C(4))/CP
  C(6)=-GL*(J*PI*DN/ROL/COSB-CL*PRFNL)/FNL**2+(CV-
CL)*PRGV/FNL
  CALL RKM(X,DX,N,IS,B,C)
  PV=B(1)
  CV=B(2)
  TVR=B(3)
  CL=B(4)
  TL=B(5)
150  PL=B(6)
  DLP=PL-PV
  WRITE(6,*) ' X=',X, ' PV=',PV, ' CV=',CV, ' GV=',GV, ' MAX=',MAX
  IF(K.EQ.KK)WRITE(8,*) ' X=',X, ' PV=',PV, ' CV=',CV, ' FN=',FN,
  & ' GV=',GV, ' DN=',DN, ' ROL=',ROL, ' TL1=',TL1, ' PL1=',
TV=',
  & TV, ' IV=',IV, ' U=',U, ' TVR=',TVR, ' H=',H, ' ALFA=',ALFA,
  & ' MAX=',MAX, ' PRGV=',PRGV, ' COSG=',COSG,
COSB=',COSB,
  & ' KN=',KN, ' CL=',CL, ' GL=',GL, ' FNL=',FNL, ' TL=',TL, ' PL=',PL,
  & ' DLP=',DLP
  IF(K.EQ.KK)K=0
  IF(MAX.LT.1.1)GOTO 140
16  STOP
  END
SUBROUTINE RKM(A,DX,N,IS,B,C)
DIMENSION F(10),G(40),C(10),B(10)
IS=IS+1

```

```

      GOTO(10,30,60,80),IS
10   E=A
      DO 20 I=1,N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
20   B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      GOTO 50
30   DO 40 I=1,N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
40   B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
50   A=E+DX/2.
      GOTO 100
60   DO 70 I=1,N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
70   B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      A=E+DX
      GOTO 100
80   DO 90 I=1,N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
90   B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      IS=0
100  RETURN
      END

```

```

      Файл данных CON_ST.DAT
      6 0.01E-5 0.005 1.E5 0.1 283. 1.E5 3.E-2 10.E-3 5.8E-3 8314. 18.
      3.1416 10
      N, DX, GV1, PV1, GL1, TL1, PL1, DN DN1, ZNC, UGC, AMV,
      PI, KK

```

```

PROGRAM ACCEL 1

```

```

' Расчет смесительного устройства,
' состоящего из сопла Лавалья и камеры смешения
$STACK 4000
SCREEN 9 :OPTION BASE 1
VIEW:WINDOW (0,0)-(250,170)
'   PROGRAM LAV27
'       расчет сопла с парогенерирующей решеткой на входе
SHARED   B(),C()
      OPEN "I",#1,"L27.DAT"
      OPEN "O",#2,"REZL27.DAT"
      input #1,N,DX,GCR,GV1,TL0,PL0,TD1,PV1

```

```

input #1, DN1, DNM, DNSR, ZNC, ZNM, ZND, UGC, AMV, PI
input #1, KK, DD1, B3, CV1
CLOSE #1
X0=0:Y0=145
Z=ZNC+ZNM+ZND
color ,0
read D$,R$,A$,P$,K$,S$,O$
LINE(X0,Y0+DN1*1000/2)-STEP(ZNC*1000,-(DN1-
DNM)*1000/2),14
LINE -STEP(ZNM*1000,0),14
LINE -STEP(ZND*1000,(DNSR-DNM)*1000/2),14
LINE(X0,Y0-DN1*1000/2)-STEP(ZNC*1000,(DN1-
DNM)*1000/2),14
LINE -STEP(ZNM*1000,0),14
LINE -STEP(ZND*1000,-(DNSR-DNM)*1000/2),14
line (x0,y0-20)-step(Z*1000,-100),7,bf
line (x0,y0-20)-step(Z*1000,-100),15,b
LOCATE 23,2:PRINT d$;"= MPa ";R$;P$;"= g/s";
locate 23,45:print A$;K$;"= mkm";
locate 24,2:print S$;P$;"= m/s ";S$;K$;"= m/s";
ILTL0=YIL(TL0)*GCR
FF1=PI*DN1^2/4.
PV=PV1
TD=TD1
TV1=5.677*PV^0.25+273.
GV=GV1
CV=CV1
ROV=1.213E-5*PV1^.9375
FV1=GV1/ROV/CV1
FD1=FF1-FV1
GD1=GCR-GV1
CD1=GD1/RO(TD1)/FD1
CD=CD1
TV=TV1
ISTAR=GV1*(YIV(TV1)+CV1^2/2)+GD1*(YIL(TD1)+CD1^2/2)
locate 10,65:print using "DI=##.### %";(ILTL0-
ISTAR)/ISTAR*100;
IK=0
ROSGR=ROL*(1.-PI*2.^0.5/6.)
N=6
DD=DD1
B(1)=PV

```

```

B(2)=GV
B(3)=DD
B(4)=CV
B(5)=CD
B(6)=TD
140  locate 15,65:color 15:print using "X= ###.# mm";x*1000;
      X=X+DX
      K=K+1
      for LL=1 to 4
      GD=GCR-GV
      ROD=RO(TD)
      ROV=1.213E-5*PV^.9375
      TV=5.677*PV^.25+273.
      VISV=(8.35+3.42E-2*(TV-273.))+2E-5*(TV-273.)^2)*1E-6
      RED=ABS(CV-CD)*DD*ROV/VISV
      RE=RED:GOSUB 200
      CX=CXX
      DSTAR=CX*PI*DD^2*ROV*ABS(CV-CD)*(CV-CD)/8.
      SCVD=91.5*(TL0-TV)/(TL0+TV)^.5
      IF X<ZNC then DN=DN1-(DN1-DNM)*X/ZNC
      IF(X>ZNC AND X<=(ZNC+ZNM)) then DN=DNM
      IF(X>(ZNC+ZNM)) then DN=DNM+(DNSR-DNM)*(X-
(ZNC+ZNM))/ZND
      FF=PI*DN^2/4.
      FD=GD/ROD/CD
      FV=FF-FD
      REV=CV*DN*ROV/VISV
      CF=.079/REV^.25
      TW=CF*ROV*CV^2/2.
      PRV=1.28-4.4E-3*(TV-273.))+2.4E-5*(TV-273.)^2
      LAMV=(1.801+2.69E-3*(TV-273.))+3.02E-5*(TV-273.)^2)*1.E-2
      PPROV=8.805129E4*PV^62.5E-3
      ALFA=(2.+6*RED^.5*PRV^.33)*LAMV/DD
      GCV=UGC/AMV
      PVTD=((TD-273.)/5.667)^4
      CAP=B3/PV^.56
      JVI=PVTD*CAP/(1.-.4*CAP)/(2.*GCV*PI*TD)^.5
      JVC=PV*CAP/(1.-.4*CAP)/(2.*GCV*PI*TV)^.5
      RJV=JVI-JVC
      IVTD=YIV(TD)
      IVTV=YIV(TV)
      CPDIT=CPL(TD)

```

```

CPD=4275.5-2.44418*(TD-273.)+1.7947E-2*(TD-273.)^2
CVD1=((GV*CV^2+GD*CD^2)/(GV+GD))^.5
FIN=CVD1/SCVD
IF X<ZNC then PRFN=-PI*(DN1-(DN1-DNM)*X/ZNC)*(DN1-
DNM)/2./ZNC
  IF(X>=ZNC AND X<=(ZNC+ZNM)) then PRFN=0.
  IF(X>(ZNC+ZNM)) then
    PRFN=PI*(DNM+(DNSR-DNM)*(X-(ZNC+ZNM))/ZND)*(DNSR-
DNM)/(2.*ZND)
  end if
  C1=.75*CX*ROV*CV*FD*ABS(CV/CD-1.)*(CV/CD-
1)*((CD/CV)^2-ROV/ROD)/DD
  C2=(1.+(1.-CD/CV)-ROV*CV/(ROD*CD))*6.*RJV*FD/DD
  C3=CV/FV/(CV^2/PPROV-(GD/GV)*(CV/CD)^3*(ROV/ROD)^2-
1.)
  TAUW=CF*PI*DN*GV/(2.*FV)
  GG=CV*ROV*PRFN
  C(1)=(C1+CF*PI*DN*GV/(2.*FV)+C2-CV*ROV*PRFN)*C3
  C(2)=6.*RJV*GD/CD/ROD/DD
  C(3)=-2.*RJV/ROD/CD
  C(4)=-
(C(1)*GV/CV/ROV+6.*DSTAR*GD/CD/PI/DD^3/ROD+TW*PI*DN+(
CV-CD)*C(2))/GV
  C(5)=-C(1)/ROD/CD+6.*DSTAR/PI/DD^3/ROD/CD
  C(6)=-6.*(SQ*RJV+ALFA*(TD-TV))/CPD/ROD/DD/CD
  CALL RKM(X,DX,N,IS)
  PV=B(1)
  GV=B(2)
  DD=B(3)
  CV=B(4)
  CD=B(5)
  TD=B(6)
  if PV<0 THEN ER=1:GOSUB 500
  if GV<0 THEN ER=1:GOSUB 501
  if DD<0 THEN ER=1:GOSUB 502
  if CV<0 THEN ER=1:GOSUB 503
  if CD<0 THEN ER=1:GOSUB 504
  IF ER=1 THEN gosub 600:GOSUB 510:STOP
next LL
IF K=KK THEN
  gosub 600
  LINE(X0+X*1000,Y0-dn*1000/2+1)-STEP(0,DN*1000-2),1

```

```

circle (x*1000+x0,25+pv/pv1*100),.5,10
paint (x*1000+x0,25+pv/pv1*100),10
circle (x*1000+x0,25+cv/2),.5,4
paint (x*1000+x0,25+cv/2),4
circle (x*1000+x0,25+cd/2),.5,2
paint (x*1000+x0,25+cd/2),2
circle (x*1000+x0,25+dd*1e6),.5,5
paint (x*1000+x0,25+dd*1e6),5
circle (x*1000+x0,25+gv*1000),.5,14
paint (x*1000+x0,25+gv*1000),14
print #2," X=";X;" PV=";PV;" GV=";GV;" GD=";GD;" DD=";DD
print #2," CV=";CV;" CD=";CD;" TV=";TV;" TD=";TD;" FF=";FF
print #2," DN=";DN;" FIN=";FIN
K=0
  END IF
  IF X<Z then GOTO 140
  gosub 510
!*****
*****
'   PROGRAM CONJT2
    OPEN "I",#1,"CJ2.DAT"
    OPEN "O",#3,"REZCJ2.DAT"
    INPUT #1,DX,ZSM,G30,CD30,TD30,PSR,DD30,KK,B3
    CLOSE #1
    line (x0+Z*1000,y0-20)-step(ZSM*1000,-100),7,bF
    line (x0+Z*1000,y0-20)-step(ZSM*1000,-100),15,b
    N=9
    DD20=DD
    PV0=PV
    CD20=CD
    TD20=TD
    G10=GV
    XV=GV/GCR
    G20=GCR*(1.-XV)
    GSM0=G10+G20+G30
    XVSM0=GCR*XV/GSM0
    ROV0=1.213E-5*PV^0.9375
    ROD20=RO(TD20)
    ROD30=RO(TD30)
    FSM0=G10/ROV0/CV+G20/ROD20/CD20+G30/ROD30/CD30
    DSM0=(4.*FSM0/PI)^0.5
    CSM0=((G10*CV^2+G20*CD20^2+G30*CD30^2)/GSM0)^0.5

```

```

    YILTW=YIL(TD)
    ILTL0=YILTW*GCR
    CP30=CPL(TD30)
    YITD30=YIL(TD30)
    IDST30=YITD30+CD30^2/2.
    IDST3=IDST30
'   ISM0=ILTL0+G30*YITD30+CD30^2/2.
    TV0=5.677*PV^0.25+273.
    ISM0=(YIV(TV)+CV^2/2.)*G10+(YIL(TD20)+CD20^2/2.)*_
        G20+(YITD30+CD30^2/2.)*G30
    DSM=DSM0
    FSM=FSM0
    G2=G20
    G3=G30
    CD2=CD20
    CD3=CD30
    DD2=DD20
    DD3=DD30
    TD2=TD20
    TD3=TD30
    GSM=GSM0
    IS=0
    B(1)=G2
    B(2)=DD2
    B(3)=CD2
    B(4)=G3
    B(5)=DD3
    B(6)=CD3
    B(7)=CV
    B(8)=IDST3
    B(9)=TD3
    K=0
    X=Z
120  X=X+DX
    K=K+1
    FOR LL=1 TO 4
        PV=PV0/((PV0/PSR-1.)*((X-Z)/ZSM)^2+1.)
    TV=5.677*PV^0.25+273.
    ROV=1.213E-5*PV^0.9375
    ROD2=RO(TD2)
    ROD3=RO(TD3)
    G1=GSM0-G2-G3

```

```

XVSM=G1/GSM0
FSM=G1/ROV/CV+G2/ROD2/CD2+G3/ROD3/CD3
DSM=(4.*FSM/PI)^0.5
CSM=((G1*CV^2+G2*CD2^2+G3*CD3^2)/GSM0)^0.5
FISM=CSM/CSM0
IVTV=YIV(TV)
IVTD3=YIV(TD3)
CP2=CPL(TD2)
CP3=CPL(TD3)
YITD3=YIL(TD3)
TD2=((ISM0-(IVTV+CV^2/2.)*G1-(YITD3+_
CD3^2/2.)*G3)/G2-CD2^2/2.)/CP2+273.
VISV=VIS(TV)
RED2=ABS(CV-CD2)*DD2*ROV/VISV
RE=RED2:GOSUB 200
CX2=CXX
DSTA2=CX2*PI*DD2^2*ROV*(CV-CD2)*ABS(CV-CD2)/8.
RED3=ABS(CV-CD3)*DD3*ROV/VISV
RE=RED3:GOSUB 200
CX3=CXX
DSTA3=CX3*PI*DD3^2*ROV*(CV-CD3)*ABS(CV-CD3)/8.
REV=CV*DSM*ROV/VISV
CF=0.079/(REV^0.25)
TW=CF*ROV*CV^2/2.
PRV=PR(TV)
LAMV=LAM(TV)
ALFA2=(2.+0.6*RED2^0.5*PRV^0.33)*LAMV/DD2
ALFA3=(2.+0.6*RED3^0.5*PRV^0.33)*LAMV/DD3
PVTD2=((TD2-273.)/5.677)^4
PVTD3=((TD3-273.)/5.677)^4
CAPI2=B3/(PVTD2^0.56)
CAPI3=B3/(PVTD3^0.56)
CAPC=B3/(PV^0.56)
GCV=UGC/AMV
JVI2=PVTD2*CAPI2/(1.-0.4*CAPI2)/(2.*GCV*PI*TD2)^0.5
JVI3=PVTD3*CAPI3/(1.-0.4*CAPI3)/(2.*GCV*PI*TD3)^0.5
JVC=PV*CAPC/(1.-0.4*CAPC)/(2.*GCV*PI*TV)^0.5
RJV2=JVC-JVI2
RJV3=JVC-JVI3
ROSM=ROV+G3*(1.-ROV/ROD3)/FSM/CD3+G2*(1.-
ROV/ROD2)/FSM/CD2
ROSGR=(1.-PI*2.^0.5/6.)*(ROD2*G2+ROD3*G3)/(G2+G3)

```



```

PPV=-2.*PV0*(PV0/PSR-1.)*(X-Z)/(ZSM^2*((PV0/PSR-1.)_
*((X-Z)/ZSM)^2+1.)^2)
C(1)=6.*RJV2*G2/CD2/ROD2/DD2
C(2)=2.*RJV2/ROD2/CD2
C(3)=-PPV/ROD2/CD2+6.*DSTA2/PI/(DD2^3)/ROD2/CD2
C(4)=6.*RJV3*G3/CD3/ROD3/DD3
C(5)=2.*RJV3/ROD3/CD3
C(6)=-PPV/ROD3/CD3+6.*DSTA3/PI/(DD3^3)/ROD3/CD3_
+(CV-CD3)*C(4)/G3
C(7)=(-FSM*PPV-TW*PI*DSM-G2*C(3)-G3*C(6)+(CV-
CD2)*C(1)_
+(CV-CD3)*C(4))/G1
C(8)=((IVTV+CV^2/2.-YITD3-CD3^2/2.)*JVC-_
(IVTD3-YITD3)*JVI3+ALFA3*(1.-CAPC)*(TV-TD3))*_
6./CD3/ROD3/DD3
C(9)=C(8)/CP3-CD3*C(6)/CP3
CALL RKM(X,DX,N,IS)
G2= B(1)
DD2=B(2)
CD2=B(3)
G3= B(4)
DD3=B(5)
CD3=B(6)
CV= B(7)
IDST3=B(8)
TD3=B(9)
ER=0
if B(1)<0 THEN ER=1:GOSUB 511
if B(2)<0 THEN ER=1:GOSUB 512
if B(3)<0 THEN ER=1:GOSUB 513
if B(4)<0 THEN ER=1:GOSUB 514
if B(5)<0 THEN ER=1:GOSUB 515
if B(6)<0 THEN ER=1:GOSUB 516
if B(7)<0 THEN ER=1:GOSUB 517
if B(8)<0 THEN ER=1:GOSUB 518
if B(9)<0 THEN ER=1:GOSUB 519
IF ER=1 THEN gosub 600:GOSUB 510:STOP
NEXT LL
IF K=KK THEN
LINE(X0+X*1000,Y0-DSM*1000/2+2)-STEP(0,DSM*1000-2),1
PRESET(X0+X*1000,Y0-DSM*1000/2+1),14
PRESET STEP(0,DSM*1000),14

```

```

circle (x*1000+x0,25+pv/pv1*100),.5,10
paint (x*1000+x0,25+pv/pv1*100),10
circle (x*1000+x0,25+cv/2),.5,4
paint (x*1000+x0,25+cv/2),4
circle (x*1000+x0,25+cd2/2),.5,2
paint (x*1000+x0,25+cd2/2),2
circle (x*1000+x0,25+cd3/2),.5,1
paint (x*1000+x0,25+cd3/2),1
' circle (x*1000+x0,25+dd*1e6),.5,5
' paint (x*1000+x0,25+dd*1e6),5
circle (x*1000+x0,25+g1*1000),.5,14
paint (x*1000+x0,25+g1*1000),14
print #3," X=";X;" PV=";PV;" G1=";G1
print #3," G2=";G2;" G3=";G3;" CV=";CV;" CD2=";CD2
print #3," CD3=";CD3;" DD2=";DD2;" DD3=";DD3;" TD2=";TD2
print #3," TD3=";TD3;" GSM=";GSM;" DSM=";DSM;"
FISM=";FISM
  GOSUB 600
  k=0
  END IF
  IF X<(Z+ZSM) THEN GOTO 120

'WRITE(6,*) ' X=',X,' PV=',PV,' G1=',G1,
' & ' G2=',G2,' G3=',G3,' CV=',CV,' CD2=',CD2,
' & ' CD3=',CD3,' DD2=',DD2,' DD3=',DD3,' TD2=',
' & TD2,' TD3=',TD3,' GSM=',GSM,' DSM=',DSM,' FISM=',FISM,
' & ' ROSM=',ROSM,' ROSGR=',ROSGR,' YILTW=',YILTW
' IF(K.EQ.KK) WRITE(8,*) ' X=',X,' PV=',PV,' G1=',G1,
' & ' G2=',G2,' G3=',G3,' CV=',CV,' CD2=',CD2,
' & ' CD3=',CD3,' DD2=',DD2,' DD3=',DD3,' TD2=',
' & TD2,' TD3=',TD3,' GSM=',GSM,' DSM=',DSM,' FISM=',FISM,
' & ' ROSM=',ROSM,' ROSGR=',ROSGR,' YILTW=',YILTW
  GOSUB 510
GOSUB 510
STOP
END

```

```

*****

```

```

*****

```

```

SUB RKM(A,DX,N,IS)
  DIM F(10),G(40)
  IK=IK+1

```

```

      on IK GOTO 10,30,60,80
10   E=A
      for I=1 to N
      F(I)=B(I)
      G(4*I-3)=C(I)*DX
      B(I)=F(I)+G(4*I-3)/2.
      next
      GOTO 50
30   for I=1 to N
      G(4*I-2)=C(I)*DX
      B(I)=F(I)+G(4*I-2)/2.
      next
50   A=E+DX/2.
      GOTO 100
60   for I=1 to N
      G(4*I-1)=C(I)*DX
      B(I)=F(I)+G(4*I-1)
      next
      A=E+DX
      GOTO 100
80   for I=1 to N
      G(4*I)=C(I)*DX
      B(I)=G(4*I-3)+2.*(G(4*I-2)+G(4*I-1))
      B(I)=(B(I)+G(4*I))/6.+F(I)
      next
      IK=0
100  abb=0
      END sub 'rkm
FUNCTION RO(A)
RO=999.9-0.1475*(A-273.)-2.695E-3*(A-273.)^2
END FUNCTION
FUNCTION YIL(A)
YIL=(12.475+3.935*(A-273.)+1.3125E-3*(A-273.)^2)*1.E3
END FUNCTION
FUNCTION CPL(A)
CPL=4331.-3.09*(A-273.)+1.98E-2*(A-273.)^2
END FUNCTION
FUNCTION YIV(A)
YIV=(2461.1+2.636*(A-273.)-4.88E-3*(A-273.)^2)*1.E3
END FUNCTION
FUNCTION SIG(A)
SIG=(75.54-0.168*(A-273.))*1.E-3

```

```

END FUNCTION
FUNCTION VIS(A)
  VIS=(613.-4.227*(A-273.)+9.22E-3*(A-273.)^2)*1.E-6
END FUNCTION
FUNCTION SQV(A)
  SQV=(2447.7-1.283*(A-273.)-6.26E-3*(A-273.)^2)*1.E3
END FUNCTION
FUNCTION PR(A)
  PR=1.28-4.4E-3*(A-273.)+2.4E-5*(A-273.)^2
END FUNCTION
FUNCTION LAM(A)
  LAM=(1.801+2.69E-3*(A-273.)+3.02E-5*(A-273.)^2)*1.E-2
END FUNCTION

200  IF RE>=0. AND RE<=1. then CXX=24./RE
      IF RE>=1. AND RE<=390. THEN CXX=24./(RE^0.667)
      IF RE>390. THEN CXX=0.45
      RETURN

500 LOCATE 15,20:PRINT D$;O$;pv;:return
501 LOCATE 16,20:PRINT r$;p$;O$;gv;:return
502 LOCATE 17,20:PRINT a$;k$;O$;dd;:return
503 LOCATE 18,20:PRINT s$;p$;O$;cv;:return
504 LOCATE 19,20:PRINT s$;k$;O$;cd;:return
511 LOCATE 15,20:PRINT "G2 ";O$;G2;:return
512 LOCATE 16,20:PRINT "DD2 ";O$;DD2;:return
513 LOCATE 17,20:PRINT "CD2 ";CD2;:return
514 LOCATE 18,20:PRINT "G3 ";O$;G3;:return
515 LOCATE 19,20:PRINT "DD3 ";O$;DD3;:return
516 LOCATE 15,20:PRINT "CD3 ";O$;CD3;:return
517 LOCATE 16,20:PRINT "CV ";O$;CV;:return
518 LOCATE 17,20:PRINT "IDST3 ";O$;IDST3;:return
519 LOCATE 18,20:PRINT "TD3";O$;TD3;:return
600 color 10:locate 23,11:print using "#.###";pv*1e-6;
    color 14:locate 23,33:print using "###.#";gv*1000;
    color 5:locate 23,60:print using "##.###";dd*1e6;
    color 4:locate 24,16:print using "###.#";cv;
    color 2:locate 24,45:print using "###.#";cd;
    color 15:locate 16,65:print using"TV= ###.# K";tv;
    locate 17,65:print using"TD= ###.# K";td;
    locate 18,65:print using"XV= #.### ";gv/gcr;
    locate 19,65:print using"FIN=#.### ";fin;
    locate 20,65:print using"DSM=###.# mm";DSM*1000;

```

return

data "Pressure ", "Rashod ", "Diametr ", "vap ", "droplt "

data "Velocity ", "negative "

510 do while inkey\$=""

Файл данных L27.DAT

6 0.1E-3 0.28 0.0024 428. 0.6E6 427. 0.45E6

3.E-2 9.8e-3 2.E-2 4.E-2 2.E-3 105.E-3 8314. 18. 3.1416

2 15.E-6 1.038 2.2

N DX GCR GV1 TL0 PL0 TD1 PV1

DN1 DNM DNSR ZNC ZNM ZND UGC AMV PI

KK DD1 B3 CV1

Файл данных CJ2.DAT

0.1E-3 0.04 0.25 30. 283. 1.E5 2.E-5 2 35.

DX ZSM G30 CD30 TD30 PSR DD30 KK B3

Литература

1. Baker O. Papelines for simultaneous flow Oil and Gas // Oil and Gas Journal.-1954.- V.53.-No.12.-P.185-195.
2. Козлов Б.К. Виды течений газожидкостных смесей и границы их устойчивости // ЖТФ.- 1954.-Т.24.-С.2285-2288.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-М.: Наука,1981.-608 с.
4. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки.- М.: Атомиздат, 1978.- 160 с.
5. Вайсман М.Д. Термодинамика парожидкостных потоков.- Л.: Энергия, 1967.- 272 с.
6. Ивандаев С.И. К определению законов взаимодействия между составляющими газожидкостного дисперсно-кольцевого потока.- В кн.: Нелинейные волновые процессы в двухфазных средах.- Новосибирск, 1977.
7. Невинский В.В. Газодинамика плоских и пространственных течений.-Л.: ЛПИ, 1975.-174 с.
8. Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В. Теплообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций.- М.:Наука, 1982.-368 с.
9. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред.-М.:Наука,1982.- 336 с.
10. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1.-М.:Наука, 1987.- 464 с.
11. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения.-М.:Мир, 1972.-440 с.
12. Справочник по теплообменникам: Т.1/ Пер. с англ.: Под ред. Б.С. Петухова, В.К. Шикова.-М.:Энергоатомиздат,1987.-560 с.
13. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.- М.:Энергия, 1975.-486 с.
14. Невинский В.В., Розенблюм В.И., Шлейфер А.А. Одномерное движение двухфазного потока в каналах переменного сечения с прямолинейной осью.-В кн.: Вопросы энергопереноса в неоднородных средах.-Минск,1975.
15. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость.-М.: Наука, 1972.-312 с.
16. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. Справочник / Скрипов В.П. и др.- М.:Атомиздат, 1980.-208 с.
17. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена.-М.: Атомиздат, 1979.- 416 с.
18. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов.-М.: Мир, 1980.- 516 с.

19. Пути повышения эффективности сопел, работающих на вскипающих потоках / В.А. Барилевич и др. // Изв. вузов. Сер. Энергетика.-1987.-№5.- С.56-60.
20. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред.- М.: Энергоиздат, 1981.-472 с.
21. Вскипающие адиабатные потоки/В.А. Зысин и др.М.: Атомиздат,1976.- 152 с.
22. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа.- М.: Наука, 1978.-736 с.
23. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации.-М.: Энергия, 1977.-239 с.
24. Катаока и др. Образование и распределение капель по размерам в кольцевом двухфазном течении // Труды ASME, теоретические основы инженерных расчетов.- 1983.-№2.-С.166-175.
25. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа.- М.: Гос.изд. Физико-математической лит., 1963.- 400 с.
26. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен, т.1.- М.: Мир, 1990.-384 с.
27. Форсайт Дж., Малкольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений: Пер. с англ.- М.: Мир, 1980.- 280 с.
28. Кочин Н.Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления.- М.: Наука, 1965.- 426 с.
29. Хамед А. Динамика движения твердых частиц в венцах закрученных лопаток//Труды ASME, Теоретические основы инженерных расчетов.- М.: Мир, 1984.- №4.-С.86-92.
30. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем.- М.: Изд. МЭИ, 2000.- 373 с.
32. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. Одномерный расчет инжекторов, работающих на водяном паре и вскипающей воде // Труды СПбГТУ (энергетические машины и установки), 1999 .- № 481.-С.3-13.
33. Эллиот Д. Исследование применения насосов с несущим газом в ракетных двигателях // Вопросы ракетной техники. 1964.- № 4.- С. 88-112.
34. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй.- М.: Наука, 1984.- 716 с.
35. Гликман Б.Ф. О конденсации струи пара в пространстве, заполненном жидкостью // Изв. АН СССР. ОТН, 1957.- № 2.- С.43-48.
36. Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости.- М.: Наука, 1965.- 431 с.
37. Накоряков В.Е., Сафарова Н.С. Простая формула для определения поверхности раздела фаз при конденсации затопленной струи пара // Изв. Сиб. Отд. АН СССР, 1975, вып. №2.- №8.- С. 69-71.
38. Галин Н.М., Кирилов П.Л. Тепло-массообмен (в ядерной энергетике).- М.: Энергоатомиздат, 1987.- 375 с.

39. Анисимов А.С. Исследование рабочего процесса струйного смесителя парогенерирующей системы.-Л.: Изд. ЛПИ, автореф. Канд. Дисс.,1980.-16с.
40. Барилевич В.А., Иванов Б.К. О длине сопел Лавалья, работающих на вскипающих потоках // Труды ЛПИ. – 1977. - №358. – С.37-42.
41. Барилевич В.А. Расчет сопел с парогенерирующими решетками, работающих на вскипающей воде // Изв. ВУЗов СССР. Энергетика. – 1991. - №7. – С.72-77.
42. Блинков В.Н., Фролов С.Д. Модель течения вскипающей жидкости в соплах // ИФЖ.–1982.–Т.42.-№5.–С.741-746.
43. Виноградов В.Е., Синицын Е.Н. Разгон потока вскипающей воды в коротких соплах // ТВТ.– 1988.– Т.26. - №2.–С.311-314.
44. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей.- М-Л.: Изд. АН СССР, 1959.-458 с.
45. Перник А.Д. Проблемы кавитации.-Л: Изд. Судостроение, 1966.-439 с.
46. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей.- М.: Гос. Изд. Техн.-теор. Лит. 1951.
47. Зельдович Я.Б. // ЖЭТФ, т. 12, вып.11-12, 1942.
48. Пирсол И. Кавитация.-М.: Мир, 1975.-93 с.
49. Столяров А.А., Кондуков Н.Б. О плотности потока адиабатических течений испаряющейся жидкости // ИФЖ.-1968.-т.15.-№3-С.385-391.
50. Барилевич В.А., Мирошников С.Ф., Стариков В.И. К расчету двухфазной турбины, работающей на вскипающей воде // Труды ЛПИ .-1986.-№ 420.-С. 58-65.
51. Барилевич В.А. и др. Расчет межлопаточного канала гидропаровой турбины // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1992. - №4. – С. 69-74.
52. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. Осевые гидропаровые турбины, особенности расчета и проектирования // Сборник научных трудов “Современные проблемы нетрадиционной энергетики”. Изд. СПбГТУ.-1996.-С. 112-117.
53. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. К расчету ковшовых турбин, работающих на вскипающих потоках // Труды СПбГТУ.-1997.-№ 465.-С. 96-105.
54. Барилевич В.А., Мирошников С.Ф., Смирнов Ю.А. Расчет сопел Лавалья, работающих на вскипающей воде // Труды СПбГПУ.-2004.-№ 491.-С. 47-56.
55. Барилевич В.А., Смирнов Ю.А. Гидропаровые турбины в энергетике // Труды СПбГПУ.-2004.-№ 491.-С. 56-68.
56. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика,ч.II.- М.: Гос. Изд. Физ.- Мат. Лит., 1963.-727 с.
57. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика в атомной и тепловой энергетике – М.: Энергоатомиздат,1984.- 422 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Раздел I. Одномерный двухфазный поток	5
1. Течение идеального газа в сопле Лавалья	5
2. Модель гомогенного потока	11
3. Дисперсно-кольцевое течение	21
3.1. Уравнение сохранения потока массы	21
3.2. Уравнения движения	27
3.3. Уравнения энергии	40
4. Дисперсное течение	46
4.1. Движение идеального газа с твердыми частицами в сопле Лавалья	46
4.2. Расчет сопла Лавалья, работающего на идеальном газе с испаряющимися каплями	50
4.3. Высоковлажный поток	54
4.4. Смешение парокапельных потоков	58
4.5. Охлаждение газового потока дисперсной фазой	61
5. Вскипающий поток	63
5.1. Модель вскипающего потока	63
5.2. Расчет сопла Лавалья с парогенерирующей решеткой	67
6. Поток с пузырьковой структурой	70
6.1. Изотермическое движение жидкости с пузырьками воздуха	71
6.2. Газожидкостный поток пузырьковой структуры с учетом теплообмена между фазами	74
6.3. Конденсация потока с пузырьковой структурой – скачок конденсации	76
6.4. Кавитационные явления при движении капельной жидкости в каналах переменного сечения	81
7. Воздействия на поток	95
7.1. Расчет инжектора, работающего на сухом насыщенном паре	95
7.2. Кризис течения в спутных и двухфазных потоках	101
7.3. Парогенерирующие каналы	104
Раздел II. Движение частиц и двухфазного потока в криволинейных каналах	112
8. Движение капли в сепараторе влаги	112
9. Движение двухфазного потока в криволинейном канале	115

10. Движение капли в относительной системе координат	121
Раздел III. Пространственный поток – основные положения	128
11. Уравнение сплошности	128
12. Уравнение движения	130
13. Уравнение энергии	137
13а. Движение газочапельного потока в адиабатическом канале	139
Раздел IV.	
14. Экспериментальное исследование вскипающих и высоковлажных потоков	152
15. Конденсация в спутных потоках	174
16. Охлаждение высоконагретых поверхностей двухфазными средами	183
Приложение №1	189
Приложение №2	210
Приложение №3	236
Приложение №4	281
Приложение №5	291
Приложение №6	349
Литература	421
Содержание	424