

На правах рукописи

КУМЗЕРОВА Екатерина Юрьевна

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ПУЗЫРЕЙ ПАРА
В УСЛОВИЯХ ПАДЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2004

Работа выполнена в Секторе численного моделирования Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
ст. научный сотрудник Шмидт Александр Александрович.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор

кандидат физико-математических наук,
доцент Булович Сергей Валерьевич.

Ведущая организация: Балтийский государственный технический университет
«Военмех»

Защита состоится « » _____ 2004 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корпус 1, кафедра гидроаэродинамики).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « » _____ 2004 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Зайцев Д.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Процессы возникновения и эволюции пузырей играют важную роль в физике, химии, технологии, медицине и многих других областях жизни. Поведение пузырей часто бывает удивительным и неожиданным, а в некоторых случаях до сих пор необъяснимым. В частности, представляющая большой фундаментальный и практический интерес проблема вскипания жидкостей, в которой определяющую роль играют появление и эволюция паровых пузырей, до сих пор далека от окончательного решения. Вскипающие потоки встречаются во многих природных и промышленных процессах. Среди них двухфазные течения в котлах и парогенераторах, течения насыщенной и недогретой жидкости в каналах систем охлаждения, в том числе двухфазные истечения в результате аварий на ядерных реакторах, а также многие другие.

Под вскипающими потоками в этой работе понимаются такие двухфазные потоки, в которых появление дисперсной фазы (пузырей) происходит за счет падения давления жидкости ниже давления насыщения, что является одним из случаев метастабильного состояния для системы жидкость-газ.

Резкое падение давления в рассматриваемых системах может быть результатом, либо аварийной разгерметизации сосудов, находящихся под большим давлением, либо, например, увеличения расхода в каналах с меняющимся сечением. При увеличении расхода больше некоторого определенного значения, давление в части потока падает ниже давления насыщения, начинается процесс нуклеации, и волна вскипания распространяется по потоку, вызывая резкое изменение давления жидкости, обусловленное ростом образовавшихся пузырей. Это объясняет одну из причин необходимости изучения таких явлений: модуляция давления взрывным вскипанием важна для оценки механических напряжений конструкции.

Кроме того, при строгой постановке задачи расчета нестационарных вскипающих потоков характер процесса может существенно определяться его начальной фазой, то есть изучаемые явления могут обладать "памятью".

Следует заметить, что экспериментальные исследования таких двухфазных систем представляют определенные технические трудности, связанные с малыми характерными временами процессов, большими давлениями и температурами.

В этих условиях численное моделирование таких процессов является эффективным и перспективным инструментом исследования и представляет интерес с точки зрения развития теории многофазных течений, теории неравновесных фазовых переходов и теории метастабильного состояния жидкостей.

Цели работы

Основной целью диссертационной работы является углубление понимания физических процессов, происходящих в жидкости при быстром изменении давления. Для этого:

1. Разработаны математическая модель и численный метод для описания вскипания жидкости под действием падения давления;
2. Проведен анализ влияния механизмов нуклеации на образование паровой фазы;
3. Исследовано влияние параметров несущей и дисперсной фаз, а также формы и размеров каналов на структуру вскипающих потоков.

Научная новизна работы

В диссертационной работе впервые:

1. Разработана математическая модель двухфазной газожидкостной среды, позволяющая исследовать различные механизмы нуклеации и их совместное влияние на параметры среды, а также анализировать процессы межфазного переноса и динамику возникающих пузырьков;
2. Разработан алгоритм решения сформулированных уравнений, обеспечивающий второй порядок точности по времени и пространственным координатам в областях гладких решений и позволяющий определить параметры несущей фазы, объемного содержания, температуры и давления паровой фазы, концентрации и размеров пузырей;
3. Показано влияние и относительный вклад различных механизмов нуклеации (объемной гомогенной, объемной гетерогенной и пристенной) в задачах вскипания жидкости в результате быстрого понижения давления;

4. Показано, что учет распределения ядер по размерам существенен для определения параметров несущей и дисперсной фазы.

Достоверность полученных результатов

Достоверность работы подтверждается тем, что полученные в ходе тестирования модели и алгоритма результаты совпадают с известными экспериментальными данными. В частности, результаты расчетов были сопоставлены с экспериментальными данными по глубине провала давления в задаче о разгерметизации трубы, заполненной водой при больших давлении и температуре, (Alamgir et al. // Journal of Heat Transfer. -1980. -V.102. -N.3. -P.433-438; Alamgir et al. // Journal of Heat Transfer. -1981. -V.103. -N.1. -P.52-55) и критическим расходам двухфазных течений в соплах (Abuaf et al. / Experimental. Reports NUREG/CR-1864, BNL-NUREG-51317 -1981; Xu et al. // Experimental Thermal and Fluid Science -1997. -Vol.14, -P.166-173).

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. Выявленные свойства нуклеации и дальнейшего роста зародышей паровой фазы и их влияние на структуру вскипающего потока могут быть полезными для более глубокого понимания физических процессов, происходящих при падении давления жидкости;
2. Проведенный численный анализ влияния ряда определяющих параметров на свойства рассматриваемых двухфазных течений дополняет ограниченный объем существующей экспериментальной информации;
3. Накопленная информация по численному моделированию вскипающих потоков в условиях быстрого падения давления может использоваться при решении возникающих в инженерной деятельности реальных практических задач.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на восьми российских и международных конференциях и семинарах:

4^{ой} Международной конференции по многофазным течениям (Нью-Орлеан, США, 2001); XIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И.Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2001); XIX Международном семинаре по струйным, отрывным и нестационарным течениям (Санкт-Петербург, 2002); III российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2002), Русско-японском международном симпозиуме по актуальным проблемам вычислительной механики (Санкт-Петербург, 2002); XIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И.Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Рыбинск, 2003); Международном коллоквиуме Euromech Colloquium 447 (Таллинн, 2003); XII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Владимир, 2003).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации изложены в шести опубликованных работах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из четырех глав, заключения и списка литературы из 95 наименований. Работа изложена на 103 страницах машинописного текста, включая 47 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе кратко рассматриваются физические процессы, сопровождающие быстрое падение давления в жидкости, и обосновывается актуальность выбранной темы исследования. В разделах 1.2 и 1.3 представлен обзор истории развития данной проблемы, включающий в себя рассмотрение теоретических и экспериментальных исследований вскипающих потоков и обзор работ по моделированию нуклеации. В разделе 1.4 делаются выводы о текущем состоянии исследований по этому направлению, главные из которых можно сформулировать в следующем виде:

- адекватное моделирование вскипающих потоков должно учитывать как мгновенное зародышеобразование в месте начала нуклеации, так и непрерывно меняющуюся концентрацию и распределение по размерам пузырей в потоке;
- работы по моделированию нуклеации, развивающиеся в двух направлениях, включают в себя расширение модели гомогенной нуклеации и исследование возникновения пузырьков на стенке. Гетерогенное зародышеобразование в объеме, а также относительный вклад различных механизмов нуклеации практически не исследовался;
- существующие модели вскипающих течений в соплах и трубах в большинстве своем используют эйлеров подход для описания двухфазной системы и одномерную или квазиодномерную постановку, что не дает возможности учитывать влияние разных механизмов нуклеации и, в том числе, приводит к потере информации о форме и размерах рассматриваемого канала.

Вторая глава посвящена описанию математической модели течения вскипающей жидкости. В разделе 2.1 подробно рассматриваются физические явления, сопровождающие течения жидкости в условиях резкого падения давления, включающие в себя рассмотрение метастабильных фазовых состояний жидкости, процессов гомогенного и гетерогенного зародышеобразования.

В разделе 2.2 сформулированы рассматриваемые задачи динамики вскипающей жидкости и обоснован выбор такого набора задач, в который входят одномерные (задача о разгерметизации трубы, задача о «закрытии клапана») и двумерные (течения в канале переменного сечения и течения в канале с внезапным расширением) двухфазные течения.

В разделе 2.3 приведено обоснование основных допущений модели, которые сводятся к равноскоростному приближению, пренебрежению массовыми силами и термодинамическому неравновесию между фазами.

Раздел 2.4 посвящен выбору подхода к описанию двухфазных сред. Для данного исследования предпочтение отдается лагранжево-эйлеровскому подходу, как более современному и больше отвечающему целям работы. В рамках представляемой работы эйлерова часть описывает течение несущей фазы в приближении многоскоростных континуумов, а лагранжева – динамику и эволюцию пузырей в предположении отсутствия проскальзывания между фазами.

Описание эйлерова этапа приведено в разделе 2.5 и включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии несущей фазы, а также процессы образования и конвективного переноса пузырей. Для рассматриваемых задач двумерные осесимметричные уравнения эйлеровского этапа в традиционных обозначениях для координат и проекций скорости в предположении скоростной равновесности фаз записаны в следующем виде:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_r}{\partial r} = -f, \quad (1)$$

где z - вектор консервативных переменных. F_x, F_r - потоки, f - источниковый член:

$$z = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\rho_l \\ (1-\alpha)\rho_l u \\ (1-\alpha)\rho_l v \\ (1-\alpha)\rho_l E_l \\ N_b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$F_x = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\rho_l u \\ (1-\alpha)[\rho_l u^2 + p_l] \\ (1-\alpha)\rho_l u v \\ (1-\alpha)[\rho_l E_l + p_l]u \\ N_b u \end{bmatrix}, \quad F_r = \begin{bmatrix} (1-\alpha)\rho_l v \\ (1-\alpha)\rho_l u v \\ (1-\alpha)[\rho_l v^2 + p_l] \\ (1-\alpha)[\rho_l E_l + p_l]v \\ N_b v \end{bmatrix}, \quad f = \begin{bmatrix} \frac{(1-\alpha)\rho_l v}{r} + \Gamma_{lv} \\ \frac{(1-\alpha)\rho_l u v}{r} + \Gamma_{lv} u \\ \frac{(1-\alpha)\rho_l v^2}{r} + \Gamma_{lv} v \\ \frac{(1-\alpha)[\rho_l E_l + p_l]v}{r} + U_{lv} + H W_{cl} \\ \frac{N_b v}{r} - H \end{bmatrix}.$$

Здесь α - объемное содержание пара, индексы l и v относятся, соответственно, к несущей и дисперсной фазе, p и ρ - давление и истинная плотность, $E_l = c_l T_l + (u + v)^2 / 2$ - удельная полная энергия несущей фазы, N_b - численная плотность пузырей. Проблема описания гетерогенной среды в рамках этого подхода сводится к определению величин, описывающих межфазные взаимодействия (обмен массой, импульсом и энергией) и скорость зародышеобразования H . Интенсивности межфазного массообмена Γ_{lv} и межфазного переноса энергии U_{lv} определяются с помощью соотношения Герца-Кнудсена. Определение скорости нуклеации H , то есть количества пузырей, возникающих в единице объема в единицу времени, является ключевым вопросом моделирования, которому посвящен раздел 2.7.

Эйлеров этап замыкает уравнение состояния воды в форме Тейта:

$$p_l = p_a K \left[\left(\frac{\rho}{\rho_a} \right)^\beta - 1 \right] + p_a \cdot \quad (3)$$

Модель динамики и эволюции пузырей рассматривается в разделе 2.6. Полная система обыкновенных дифференциальных уравнений лагранжева этапа, в предположении однородного распределения параметров внутри пузыря, включает уравнение Рэлея-Лэмба и уравнения сохранения массы и энергии:

$$\begin{aligned} R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 &= \frac{1}{\rho_l} \left\{ p_v - p_l - \frac{2\Sigma}{R} - \frac{4\mu_l}{R} \frac{dR}{dt} \right\}, \\ \frac{dp_v}{dt} &= p_v \left[\frac{1}{T_v} \frac{dT_v}{dt} - \frac{3}{R} \left\{ \frac{dR}{dt} - \frac{\eta_{ac} T_v}{p_v} \sqrt{\frac{R_v}{2\pi}} \left(\frac{p^{sat}(T_l)}{\sqrt{T_l}} - \frac{p_v}{\sqrt{T_v}} \right) \right\} \right], \\ \frac{dT_v}{dt} &= -3 \frac{T_v}{R p_v} \left\{ (\gamma_v - 1) \left(p_v + \frac{2\Sigma}{R} \right) \frac{dR}{dt} + \eta_{ac} p^{sat}(T_l) (T_v - T_l) \sqrt{\frac{R_v}{2\pi T_l}} \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Модели нуклеации, связанные с определением скорости образования зародышей H , представлены в разделе 2.7. В работе рассматриваются три типа нуклеации – объемная гомогенная, объемная гетерогенная и пристенная. В разделе 2.7.1 описаны основные моменты теории гомогенной нуклеации, согласно которой скорость нуклеации пропорциональна вероятности возникновения критического кластера вследствие термодинамической флуктуации (Френкель, 1957):

$$H = H_0 \exp \left\{ -\frac{W_{cl}}{k_b T_l} \right\}, \quad (5)$$

где W_{cl} - работа по образованию критического зародыша, k_b - постоянная Больцмана.

При предельных перегревах эта теория хорошо согласуется с экспериментом, однако на практике образование и рост зародышей начинается при существенно меньших перегревах, что связано с преобладающей ролью гетерогенной нуклеации. В случае малых центров гетерогенного зародышеобразования можно воспользоваться модифицированной теорией гомогенной нуклеации, вводя фактор гетерогенности G ($G \in (0, 1]$), который характеризует уменьшение работы W_{cl} при нуклеации на существующих ядрах. Модифицированным теориям гомогенной нуклеации посвящен раздел 2.7.2.

Хорошо известно, что на практике в необработанной специально жидкости существует множество включений (микропузырьки растворенного газа, маленькие частицы и т. п.), которые могут служить ядрами нуклеации. От их общего количества и вида распределения по размерам зависит дальнейшее поведение двухфазной системы. Построению теории объемной гетерогенной нуклеации, учитывающей распределение зародышей по размерам, посвящен раздел 2.7.3. Рассмотрены равновероятное, нормальное и логнормальное распределения (см. Рис.1).

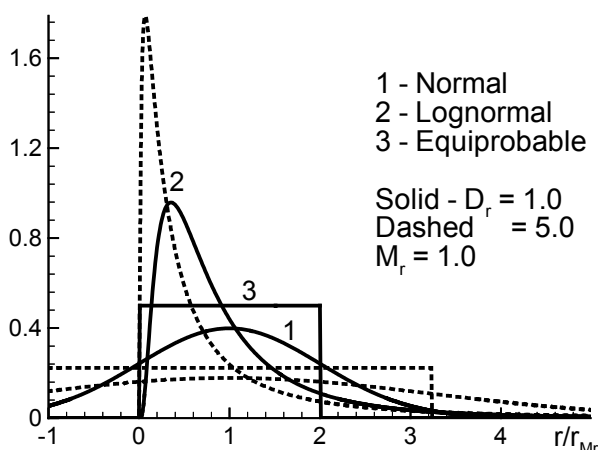


Рис.1. Вид функций различных распределений зародышей по размерам.

Ключевым вопросом моделирования является определение механизма образования зародышей паровых пузырей, способных к дальнейшему росту. Предложен механизм, когда пузырьки начинают расти на всех частицах примеси, размер которых больше критического радиуса. То есть концентрация дисперсной фазы в данный момент времени есть часть площади под кривой плотности вероятности (от текущего критического радиуса до ∞), а скорость нуклеации, соответственно, определяется как скорость изменения площади. По мере падения давления (ниже линии насыщения) критический размер пузыря уменьшается и, соответственно, концентрация зародышей, способных к дальнейшему росту, увеличивается.

В ряде случаев образование зародышей на стенках играет доминирующую роль и связано с шероховатостью поверхности, присутствием микротрещин и т.п. Модели пристенной нуклеации посвящен раздел 2.7.4. Модель основана на эмпирическом соотношении для частоты отрыва пузырьков f_{max} , плотности зародышей на стенке N_{bw} и определяемой через эти величины скорости нуклеации на стенке H_w :

$$f_{max} = 10^4 (T^{sat} - T_l)^3, \quad N_{bw} = 0.25 \cdot 10^{-7} \frac{R_d^2}{R_{cr}^4}, \quad H_w = f_{max} N_{bw}, \quad (6)$$

где R_d - радиус отрыва пузыря определяется из баланса сил поверхностного натяжения и сопротивления.

В третьей главе представлено описание численного метода.

Уравнения сохранения для несущей фазы совместно с уравнением нуклеации решаются с помощью метода Родионова второго порядка точности по времени и пространству в областях гладких решений, рассмотренного в [разделе 3.1](#). [Раздел 3.2](#) посвящен решению задачи о распаде произвольного разрыва для воды с уравнением состояния в форме Тейта, что используется для определения потоков массы и импульса на гранях вычислительной ячейки. Обыкновенные дифференциальные уравнения динамики пузырьков решаются одновременно с уравнениями для жидкости. Возможные методы решения уравнений лагранжева этапа рассматриваются в [разделе 3.3](#). Из-за существенно различных характерных времен процессов в жидкости и в пузырях уравнения динамики пузырей являются жесткими. Показано, что наиболее эффективным в данном случае является применение метод Гира для жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для реализации алгоритма используется структурированная неравномерная расчетная сетка. Увеличение точности достигается путем увеличения количества ячеек в областях больших градиентов полей физических величин, в [разделе 3.4](#) показана сходимость по сетке.

В [разделе 3.5](#) представлены результаты по тестированию численному метода, включающего в себя сравнение с теоретическим решением задачи о распаде разрыва для воды для одномерного и двумерного случаев.

В [четвертой главе](#) представлены результаты расчетов с использованием разработанных модели и алгоритма.

В [разделе 4.1](#) рассматриваются результаты расчетов одномерных задач. В качестве тестового случая рассмотрена одномерная задача о разгерметизации трубы, в которой в начальный момент времени находится вода при больших давлении и температуре. После открытия одного из концов, давление на конце падает (в модели рассматривается линейное падение давление с заданной скоростью V_p), при этом внутри трубы начинает распространяться волна разряжения. Давление в волне падает ниже линии насыщения, достигает некоего минимума и начинает расти, что обусловлено возникновением и последующим ростом паровых пузырей. Предполагается, что закрытый конец трубы находится достаточно далеко и не влияет на картину течения. Такая физическая задача является одной из ключевых при исследовании нестационарного истечения вскипающих жидкостей из сосудов высокого давления.

Проблема теоретического описания этого процесса актуальна с точки зрения анализа аварийных ситуаций на атомных электростанциях, в аппаратах химической технологии, нефтепроводах и других установках современной техники.

С целью проверки разработанного алгоритма и сделанных предположений было проведено сравнение результатов моделирования с известными экспериментальными данными, результаты которых можно видеть на Рис. 2 и 3. На Рис.2 представлено изменение во времени давления жидкости в сечении $x=0.43\text{m}$ для моделей модифицированной гомогенной нуклеации и объемной гетерогенной с нормальным распределением зародышем по размерам и экспериментальных данных (Alamgir et al., 1980). Видно, что обе модели дают хорошие совпадение по минимальному давлению, достигаемому жидкостью, однако последующее увеличение давления, связанное с ростом возникших зародышей, лучше описывается второй моделью, что можно объяснить учетом распределения зародышей по размерам.

Разницу между давлением насыщения и минимальным давлением принято называть глубиной провала давления, которая является важной характеристикой для таких задач и определение которой представляет одну из важнейших задач для практических приложений. Расчетные зависимости глубины провала давления от температуры при разных скоростях снижения давления и корреляции экспериментальных данных для этой величины (Alamgir et al., 1981) представлены на Рис.3.

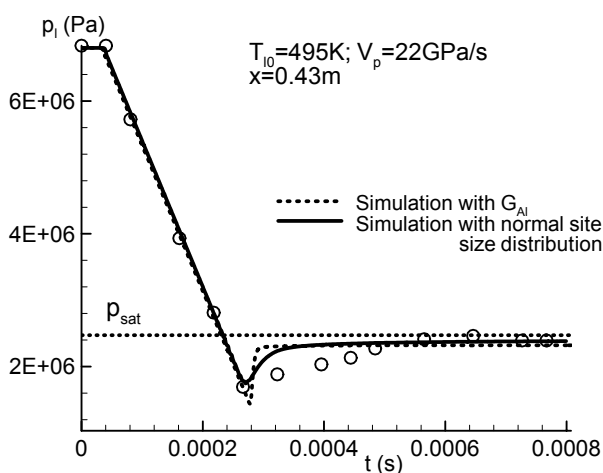


Рис.2 Изменение во времени давления жидкости в сечении трубы $x=0.43\text{m}$ для модифицированной модели гомогенной нуклеации (штриховая линия) и модели, учитывающей нормальное распределение зародышей по размерам (сплошная линия). Точки - экспериментальные данные (Alamgir et al., 1980).

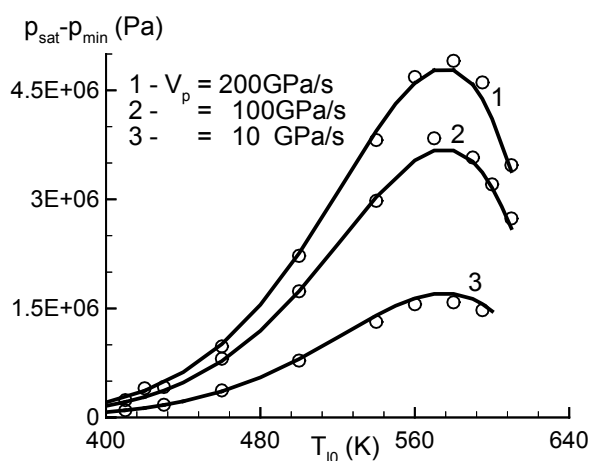


Рис.3. Зависимость глубины провала давления от начальной температуры жидкости. Линии - расчет, точки - эксперимент (Alamgir et al., 1981); 1, 2, 3 соответствуют скоростям падения давления 200 GPa/s, 100 GPa/s и 10 GPa/s.

Таким образом, показано, что сформулированная модель течения вскипающей жидкости, позволила получить хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных, что демонстрирует применимость рассматриваемого подхода к задаче о быстром падении давления в горячей жидкости.

Исследование влияния параметров распределения предложенной модели объемной гетерогенной нуклеации на поведение двухфазной среды рассматривалось на примере задачи «Закрытия клапана». Здесь в начальный момент времени в «правой» и «левой» областях задаются равные по модулю и противоположные по направлению скорости. Такая постановка задачи моделирует важную в гидравлике ситуацию, когда при течении жидкости в трубе закрывается клапан. Возникает разрежение, которое сопровождается процессом нуклеации и дальнейшим ростом паровой фазы.

Рис. 4 и 5 демонстрируют влияние выбора функции распределения. Рис.4 показывает, что давление жидкости для равновероятного распределения (модель 3), завышено по сравнению с результатами моделей, использующих нормальное (модель 1) и логнормальное (модель 2) распределения. Причины такого поведения связаны, по-видимому, со ступенчатым характером функции распределения. Из Рис.5 можно видеть, что максимальные объемные доли пара близки для разных моделей, но также видно, что для равновероятного распределения область кипения более локализована, что является прямым следствием ступенчатого характера функции плотности вероятности.

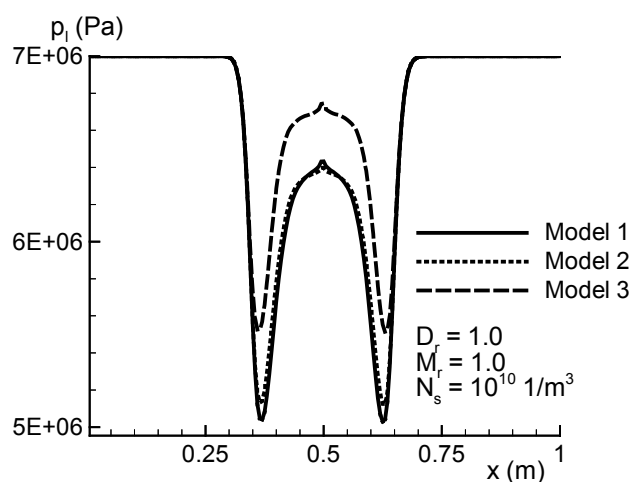


Рис.4. Распределения давления жидкостей для разных моделей.

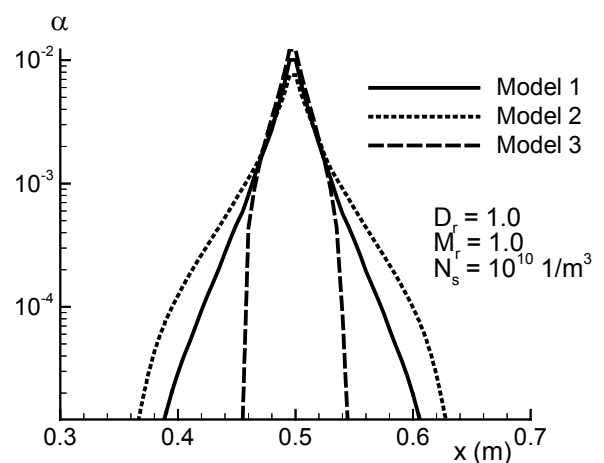


Рис.5. Распределения объемной доли паровой фазы для разных моделей.

На основе моделирования одномерных задач были сделаны выводы, что сформулированная модель применима для поставленных задач о быстром падении давления жидкости; учет распределения зародышей по размерам, существенен для определения параметров рассматриваемой двухфазной среды; равновероятное распределение дает завышенное значение давления жидкости, а также слишком локализованную область вскипания; общее количество гетерогенных зародышей является доминирующим фактором при определении параметров среды.

В ряде случаев применение одномерной (или квазиодномерной) теории является некорректным, в частности, вследствие того, что механизмы образования зародышей на стенке и в ядре потока различны, и, соответственно, влияние образовавшихся пузырей на жидкость вблизи стенки и внутри потока также различно, что может приводить к изменению структуры течения.

Для анализа относительных вкладов пристенной и объемной нуклеации рассматривались двухфазные течения в соплах и течения в канале с внезапным расширением поперечного сечения в рамках двумерных задач. Результаты по этим задачам представлены в разделе 4.2.

При течении в соплах возможны критические явления, когда увеличение расхода выше некоего критического приводит к тому, что давление в узкой части канала падает настолько, что начинается интенсивная нуклеация как на стенках, так и в ядре потока, сопровождающаяся ростом пузырей, стабилизацией давления в расширяющейся части канала вблизи давления насыщения и, соответственно, стабилизацией скорости, которая уже не будет чувствительна к изменению входных условий.

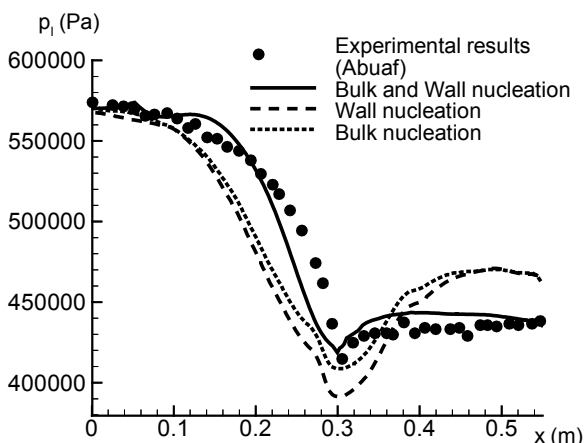


Рис.6. Сравнение с экспериментальными данными (Abuaf et al., 1981) осредненных вдоль сопла профилей давления для развитой нуклеации.

На рис.6 и 7 показано сравнение с экспериментальными данными (Abuaf et al., 1981; Xu et al., 1997) для течений в соплах. Рис.6 демонстрирует влияние механизмов пристенной и объемной гетерогенной нуклеации на давление жидкости. Можно видеть, что действие только одного из указанных механизмов приводит к недооцениванию минимального давления, достигаемого

жидкостью в критическом сечении, и к завышению давления вблизи выхода. В то время как одновременно два механизма удовлетворительно описывают осредненный вдоль сопла профиль давления. Сопоставления по максимальному расходу дало следующие результаты: 8.71kg/s согласно экспериментальным данным, 8.64kg/s – рассчитанное по модели (т.е. относительная разница 0.8%), что еще раз подтверждает применимость приведенных модели и алгоритма.

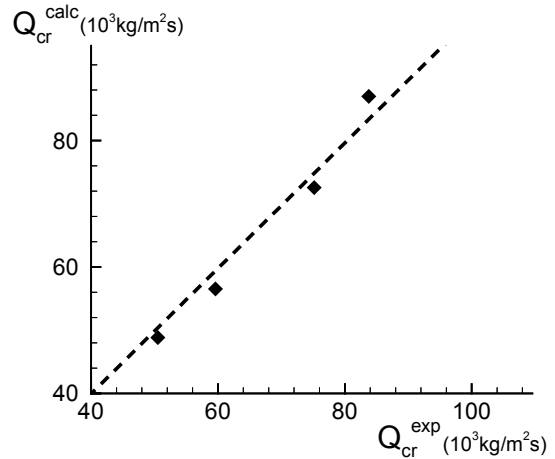


Рис.7. Сравнение с экспериментальными данными (Xu et al., 1997) по критическим расходам.

На Рис.7 представлено сравнение критических расходов с экспериментальными данными (Xu et al., 1997). Разница между данными расчета и эксперимента не превышает 7%. Таким образом, можно сделать вывод, что сформулированная модель применима для рассматриваемых двухфазных течений, а для адекватного моделирования вскипания в жидкости необходим учет, как объемной гетерогенной, так и пристенной нуклеации.

Для анализа взаимного влияния пристенной и объемной гетерогенной нуклеации исследовалась также задача о канале с внезапным расширением поперечного сечения, где предполагается, что в один из моментов времени открывается клапан, разделяющий горячую и холодную жидкость, и влево начинает распространяться волна разряжения с последующим образованием паровой фазы как в объеме, так и на стенке канала.

На Рис.8 представлены распределения концентрации пузырей и объемной доли паровой фазы для двух разных начальных температур горячей жидкости. Можно видеть, что имеет место, как пристенная так и объемная гетерогенная нуклеация, причем обе дают существенный вклад в объемную долю пара. Причем, в более горячей жидкости образуется больше пузырей, и этот эффект особенно проявляется в пристенной области, где зародышеобразование идет более интенсивно. В связи с этим объемные доли пара тем больше, чем больше начальная температура жидкости, и

достигают своих максимальных значений в областях пузырей, образовавшихся на стенке.

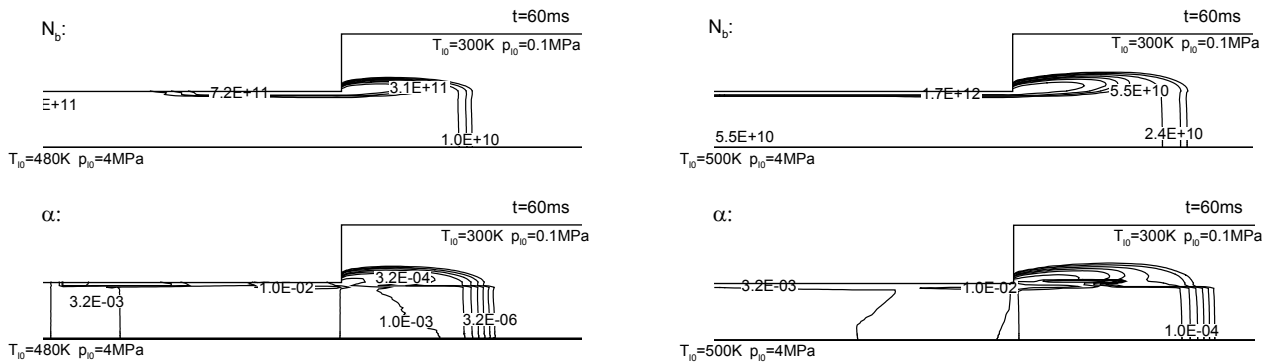


Рис.8. Распределения численной концентрации пузырей и объемной доли пара по каналу для $T_{10}=480\text{K}$ и $T_{10}=500\text{K}$

На основе рассмотренных двумерных задач были сделаны выводы, что для адекватного моделирования вскипания жидкости необходим учет обоих указанных механизмов, а также что вклад пристенной нуклеации растет с уменьшением поперечного сечения канала.

В заключении кратко сформулированы основные результаты настоящей работы:

- Проанализированы физические явления, происходящие при вскипании жидкости под действием резкого понижения давления;
- Построена математическая модель для исследования процессов, сопровождающих быстрое падение давление жидкости. Модель включает в себя различные механизмы нуклеации, межфазный перенос и динамику пробного пузыря;
- Численное моделирование позволяет определить зависимость от времени и от пространственной координаты параметров несущей фазы, объемного содержания, температуры и давления паровой фазы, концентраций и размеров пузырей;
- Исследовано влияние различных механизмов нуклеации (модифицированной гомогенной, объемной гетерогенной и пристенной) на структуру вскипающего потока;
- Выявлено, что для описания объемной гетерогенной нуклеации учет распределения зародышей по размерам существенен для определения параметров несущей и дисперсной фаз;

- Продемонстрирован относительный вклад объемной и пристенной нуклеации при течении жидкости в канале переменного сечения и показано, что для адекватного моделирования вскипания жидкости необходим учет обоих указанных механизмов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Е.Ю.Кумзерова, А.А.Шмидт. Численное исследование поведения пузырьков при быстром изменении давления жидкости // Труды конференции «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках», Санкт-Петербург, - 2001. -Том.2. -С.130-134.
2. Е.Ю.Кумзерова, А.А.Шмидт. Численное моделирование нуклеации и динамики пузырьков при быстром падении давления жидкости // Журнал Технической Физики. -2002. -Том 72. -Вып.7. -С.36-40.
3. Е.Ю.Кумзерова, А.А.Шмидт. Численное исследование влияния модели образования паровой фазы на структуру вскипающих потоков // Труды III российской национальной конференции по теплообмену, Москва. -2002. -Том 4. - С.131-135.
4. Е.Ю.Кумзерова, А.А.Шмидт. Механизмы нуклеации при распространении волны разрежения в жидкости // Тезисы докладов XII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Владимир. -2003. -С.404-406.
5. Е.Ю.Кумзерова. О влиянии распределения центров нуклеации по размерам на моделирование вскипания жидкости // Труды конференции «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и теплообмена в энергетических установках», Рыбинск, -2003. -Том 1.-С.259-262.
6. E.Yu Kumzerova and A.A. Schmidt. Effect of bubble nucleation mechanisms on flashing flow structure (Numerical Simulation) // Computational Fluid Dynamics. -2003. -Vol.11. -No.4. -P.507-512.