

DOI: 10.18721/JEST.25204
УДК 536.7; 532.5; 519.6

Е.Е. Авдеев, С.В. Булович, Ю.А. Горский

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УНОСА И ОСАЖДЕНИЯ КАПЕЛЬ В ДИСПЕРСНО-КОЛЬЦЕВОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

В работе с помощью стационарной одномерной трехжидкостной модели с равным давлением в фазах выполнен сравнительный анализ моделей уноса и осаждения капель с поверхности жидкой пленки. Анализируются предсказательные способности моделей учитывающих как чисто гидродинамический унос капель, так и пузырьковый, связанный с кипением пленки в обогреваемых каналах. Производится сравнение расчетных гидравлических характеристик двухфазного пароводяного потока с известными литературными данными: в диапазоне давлений 0,98–11,77 МПа, расходов смеси 500–3000 кг/(м²с) и массовых расходных паросодержаний 0,08–0,95 для вертикальных адиабатических каналов и давлений 2,94–10 МПа, расходов смеси 500–3000 кг/(м²с) и массовых расходных паросодержаний 0,2–0,65 для вертикальных обогреваемых каналов. По результатам анализа выявлены модели уноса и осаждения, предсказывающие рассматриваемые эксперименты наилучшим образом.

Ключевые слова: двухфазное пароводяное течение, дисперсно-кольцевой режим, трехжидкостная модель, унос и осаждение капель, численное моделирование

Ссылка при цитировании:

Е.Е. Авдеев, С.В. Булович, Ю.А. Горский/ Анализ моделей уноса и осаждения капель в дисперсно-кольцевом режиме течения // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 2. С. 54–67. DOI: 10.18721/JEST.25204.

E.E. Avdeev, S.V. Bulovich, Yu.A. Gorskiy

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

ANALYSIS OF ENTRAINMENT AND DEPOSITION MODELS IN ANNULAR DISPERSED FLOW REGIME

A comparative analysis of entrainment and deposition models was carried out using a steady-state one-dimensional three-fluid model with equal pressure in the phases. The predictive ability of the models that take into account both purely hydrodynamic entrainment of droplets and bubble entrainment associated with film boiling in heated channels is analyzed. The calculated hydraulic characteristics of two-phase steam-water flow are compared with known literature data: in the pressure range of 0,98–11,77 MPa, mixture flow rates of 500–3000 kg/(m²s), and vapor quality of 0,08–0,95 for vertical adiabatic channels and in the pressure range of 2,94–10 MPa, mixture flow rates of 500–3000 kg/(m²s) and vapor quality of 0,2–0,65 for vertical heated channels. The results of the analysis helped find the models that predict the literature data in the best way.

Keywords: two-phase steam-water flow, dispersed-annular flow regime, three-fluid model, entrainment and deposition of droplets, numerical simulation.

Citation:

E.E. Avdeev, S.V. Bulovich, Yu.A. Gorskiy, Analysis of entrainment and deposition models in annular dispersed flow regime, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25 (2) (2019) 54–67, DOI: 10.18721/JEST.25204.



Введение. Пароводяные среды встречаются в различном теплоэнергетическом оборудовании и в особенности часто в теплообменных установках, применяющихся на атомных электростанциях, безопасность которых исключительно важна. Поэтому совершенствование методик расчетов переходных и аварийных режимов работы АЭС является актуальной проблемой, а страны, развивающие атомную теплоэнергетику, также развивают и теплогидравлические расчетные коды: КОРСАР, БАГИРА (Россия), TRAC, RELAP (США), CATHARE (Франция), ATHLET (Германия), SPACE (Корея) и др.

Подходы к моделированию двухфазного пароводяного потока могут отличаться как способом описания дискретной фазы, так и полнотой учета неравновесности значений разыскиваемых функций. Однако наибольшее распространение получил подход, основанный на модели взаимопроникающих континуумов с общим давлением фаз. В указанном подходе каждая из фаз («жидкостей»), в том числе и дискретная, представлена потоком этой «жидкости» и в общем случае имеет свои скорость, температуру и истинную объемную долю. При этом различают два подхода к моделированию количества рассматриваемых «жидкостей»: двухжидкостное и трехжидкостное приближения.

Двухжидкостное приближение было хронологически первым в истории развития теплогидравлических расчетных кодов. В двухфазном пароводяном потоке оно математически учитывает течение двух взаимопроникающих потоков, а каких именно, определяется в зависимости от рассматриваемого режима течения. В целом такой подход до сих пор правомерен при расчете режимов, когда двухфазный поток строго определяется не более чем двумя жидкостями: однофазное течение, пузырьковый, снарядный, дисперсный и расслоенный режимы течения. Однако в дисперсно-кольцевом режиме, имеющем широкое приращение в реальной практике и, соответствен-

но, часто встречающемся в литературе [1–9], двухжидкостной подход не предпочтителен.

Хотя существуют модификации двухжидкостного подхода, позволяющие учесть и дисперсно-кольцевой режим. Так, например, в [10] описан подход, где при помощи алгебраического соотношения из общего количества жидкой фазы выделяют доли, приходящиеся на капли и пленку, при этом схематично разделяя скорости движения и температуру. Однако в нем двухжидкостной подход начинает испытывать определенные трудности, связанные как с ухудшением точности расчетов, так и с нарушением численной устойчивости. Численная неустойчивость при двухжидкостном подходе особенно сильно проявляется при переходе от дисперсно-кольцевого режима течения к дисперсному, когда уравнения, «обслуживающие» пленку в дисперсно-кольцевом режиме, в дисперсном режиме скачком переходят к обслуживанию капель.

Проблема численной неустойчивости при смене режимов течения двухфазного потока решается заменой двухжидкостного подхода на трехжидкостной, когда каждый набор из трех уравнений сохраняет обслуживает свою жидкость на протяжении всей карты режимов. Переход от описания двух жидкостей к трем позволяет построить более полную физическую модель двухфазного потока, неравновесную по скоростям и температурам рассматриваемых жидкостей. Таким образом, трехжидкостная модель представляет собой более подробное представление двухфазного потока, а потому зачастую используется в реальной практике [11–18].

Тем не менее при описании дисперсно-кольцевого потока при переходе от двух- к трехжидкостной модели возникает вопрос о правомерности использования тех или иных замыкающих соотношений, которые описывают обмен массой, импульсом и энергией между фазами (жидкостями), и представляют собой корреляции, полученные эмпирическим или полуэмпирическим путем. При этом зави-

симости, описывающие обмен импульсом и энергией, остаются прежними, так как интерфейсы пар–капли и пар–жидкая пленка, через которые и происходит обмен, не изменяются при переходе от двух жидкостей к трем.

Однако аналогичной полной преемственности у моделей уноса и осаждения капель с поверхности жидкой пленки нет. В двухжидкостном приближении одним из необходимых условий замыкания системы является равенство скоростей уноса и осаждения капель, то есть, другими словами, существование равновесного режима, который в действительности реализуется далеко не всегда и от которого позволяет отойти трехжидкостная формулировка. В этом смысле трехжидкостное приближение более корректно, поскольку позволяет учесть неравновесность процессов уноса и осаждения.

Цель работы – проведение сравнительного анализа различных корреляций для уноса и осаждения капель с поверхности жидкой пленки с помощью трехжидкостного кода с целью выявить те модели, которые имеют преобладающее преимущество в своей способности предсказывать параметры пароводяного потока в адиабатических и в обогреваемых каналах.

Методы и подходы

Решаемая система уравнений

Для оценки пригодности имеющихся в литературе корреляционных зависимостей по скорости уносу и осаждению капель была разработана стационарная одномерная трехжидкостная модель течения дисперсно-кольцевого парожидкостного потока. Соответственно, решаемая система уравнений состоит из девяти дифференциальных уравнений балансов массы (1)–(3), импульса (4)–(6) и энергии (7)–(9) для каждой из трех жидкостей:

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_v\rho_vW_v) = m_{dv} + m_{fv}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_d\rho_dW_d) = -m_{dv} - \Pi_{if}(S_d - S_e), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_fW_f) = -m_{fv} + \Pi_{if}(S_d - S_e), \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_v\rho_vW_v^2) + \bar{\varphi}_v\bar{A}\frac{\partial P}{\partial z} = m_{dv}(W_{di} - W_v) + \quad (4)$$

$$+ m_{fv}(W_{fi} - W_v) - \Pi_{if}\tau_{vf} - \Pi_{id}\tau_{vd} + A\varphi_v\rho_v g_z,$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_d\rho_dW_d^2) + \bar{\varphi}_d\bar{A}\frac{\partial P}{\partial z} = -m_{dv}(W_{fi} - W_v) + \quad (5)$$

$$+ \Pi_{id}\tau_{vd} + A\varphi_d\rho_d g_z - \Pi_{if}(S_dW_d - S_eW_f),$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_fW_f^2) + \bar{\varphi}_f\bar{A}\frac{\partial P}{\partial z} =$$

$$= -m_{fv}(W_{fi} - W_v) - \Pi_{wf}\tau_{wf} + \Pi_{if}\tau_{vf} + \quad (6)$$

$$+ A\varphi_f\rho_f g_z + \Pi_{if}(S_dW_d - S_eW_f),$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_v\rho_vW_vH_v) = \alpha_{vd}\Pi_{id}(T_s - T_v) +$$

$$+ \left(h_{vi} + \frac{W_{di}^2}{2} \right) m_{dv} + \alpha_{vf}\Pi_{if}(T_s - T_v) + \quad (7)$$

$$+ \left(h_{vi} + \frac{W_{fi}^2}{2} \right) m_{fv},$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_d\rho_dW_dH_d) = \alpha_{dv}\Pi_{id}(T_s - T_d) -$$

$$- \left(h_{di} + \frac{W_{di}^2}{2} \right) m_{dv} - \Pi_{if}(S_dH_d - S_eH_f), \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}(A\varphi_f\rho_fW_fH_f) = \alpha_{fv}\Pi_{if}(T_s - T_f) -$$

$$- \left(h_{fi} + \frac{W_{fi}^2}{2} \right) m_{fv} + \Pi_{if}(S_dH_d - S_eH_f) + \quad (9)$$

$$+ q_{wf}^* \Pi_{fw} - q_{wfi}^* \Pi_{fwi},$$

где A – площадь поперечного сечения канала, м²; φ_p – истинная объемная доля; ρ_p – плотность, кг/м³; W_p – скорость, м/с; h_p , H_p – удельная энтальпия и полная удельная энтальпии, Дж/кг; T_p – температура p -ой жидкости, К; T_s – температура насыщения, К; Π_p – периметр межфазной поверхности для p -ой жидкости ($p = d, f$), м; S_e , S_d – скорости уноса и осаждения капель с поверхности жидкой пленки, кг/(м²·с); α_{pv} , α_{vp} – коэффициент теплоотдачи от жидкости к межфазной поверхности и от

пара к межфазной поверхности, Вт/(м²·К); m_{dv} , m_{fv} – источники массы, описывающие фазовый переход, кг/(м·с); q_{wf}^* , q_{wfi}^* – тепловой поток от стенки канала к жидкой пленке и его часть, идущая непосредственно на генерацию пара, Вт/м²; W_{pi} – скорость межфазной поверхности для p -ой жидкости, м/с.

Рассматриваемая система уравнений сводится к матричной записи и решается методом Гаусса. В предшествующей работе [19] было проведено начальное тестирование описанной модели и показана работоспособность маршевого алгоритма, в ней же представлены подробности численной схемы.

Замыкающие соотношения

Коэффициенты трения, площади межфазных поверхностей, диаметр капель и способ расчета источников массы фазового перехода не изменялись и считались согласно [19].

Используемая модель фазового перехода предполагает наличие различных коэффициентов теплоотдачи по разные стороны от межфазной поверхности. Соответственно, коэффициенты теплоотдачи со стороны пара к жидкостям записываются [20]:

$$\alpha_{vd} = \frac{\lambda_v}{D_d} (2 + 0,6 \text{Re}_{vd}^{0,5} \text{Pr}_v^{0,33}), \quad (10)$$

$$\alpha_{vf} = \frac{\lambda_v}{(D - 2\delta)} \max(4; 0,023 \text{Re}_{vf}^{0,8} \text{Pr}_v^{0,4}), \quad (11)$$

$$\text{где } \text{Re}_{vd} = \frac{\rho_v |W_v - W_d| D_d}{\mu_v}; \quad \text{Re}_{vf} = \frac{\rho_v |W_v - W_f| (D - 2\delta)}{\mu_v}.$$

Коэффициенты теплоотдачи со стороны жидких фаз (капель и жидкой пленки) [10, 20]:

$$\alpha_{dv} = \frac{\lambda_v}{D_d} (2 + 0,6 \text{Re}_{dv}^{0,5} \text{Pr}_d^{0,33}), \quad (12)$$

$$\alpha_{fv} = \frac{\lambda_v}{2\delta} \max(4; 0,023 \text{Re}_{fv}^{0,8} \text{Pr}_f^{0,4}), \quad (13)$$

$$\text{где } \text{Re}_{dv} = \frac{\rho_d |W_v - W_d| D_d}{\mu_d}; \quad \text{Re}_{fv} = \frac{\rho_f |W_v - W_f| 2\delta}{\mu_f}.$$

Модели гидродинамического уноса и осаждения

Были проанализированы 13 моделей – вариантов замыкающих соотношений для уноса и осаждения капель. Данные расчетов по этим моделям сравнивались с результатами экспериментов для течения дисперсно-кольцевого потока в адиабатической круглой трубе. Часть из них представляют собой самодостаточные модели, когда автор в своей работе представлял обе корреляции: для скорости уноса и скорости осаждения. В другой части используемых работ представлены только одна корреляция (для уноса или для осаждения). В таких случаях известная корреляция уноса или осаждения дополнялась, соответственно, известной по другой работе корреляцией осаждения (или уноса) с целью построения завершённой модели.

Список полученных моделей представлен ниже. Каждой из рассмотренных моделей присвоен номер, под которым результаты, соответствующие этой модели, отображены на рис. 1. Каждая из моделей определяет скорость уноса (S_e , кг/(м²·с)) и осаждения (S_d , кг/(м²·с)). Большинство из представленных корреляций для осаждения зависят от концентрации ка-

$$\text{пель } C = \frac{\Phi_d \rho_d}{\Phi_v + \Phi_d}, \quad \text{кг/м}^3.$$

1) Модель Суговары [21]:

$$S_d = 9 \cdot 10^{-3} W_v \left(\frac{C}{\rho_v} \right)^{-0,5} \text{Re}_v^{-0,2} S_c^{-2/3} C, \quad (14)$$

где $\text{Re}_v = \frac{\rho_v W_v \Phi_v D}{\mu_v}$. Число Шмидта высчитывается из соотношения Льюиса: $Le = \frac{Sc}{Pr} = 1$.

$$S_e = 1,07 \cdot \frac{W_v \mu_f \tau_{fv}}{\sigma^2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0,4} \times$$

$$\times \begin{cases} k_s, & \text{Re}_v > 10^5 \\ k_s [2,136 \lg(\text{Re}_v) - 9,68], & \text{Re} < 10^5 \end{cases}$$

где $k_s = 0,57\delta + 21,73 \cdot 10^3 \delta^2 - 38,3 \cdot 10^6 \delta^3 + 55,68 \times 10^9 \delta^4$; δ – средняя толщина жидкой пленки.

2) Модель Гована–Хьюита [22]:

$$S_d = \begin{cases} 0,18153 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0.5} C; & \frac{C}{\rho_v} < 0,3, \\ 0,083 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0.5} C \left(\frac{\rho_v}{C} \right)^{0.65}; & \frac{C}{\rho_v} \geq 0,3, \end{cases} \quad (16)$$

$$S_e = \begin{cases} \left(\rho W \right)_v 5,75 \cdot 10^{-5} \left[\left(\rho W \right)_f - \left(\rho W \right)_{fcrit} \right]^2 \times \\ \times \left[\frac{D \rho_f}{\sigma \rho_v^2} \right]^{0,316}, & \left(\rho W \right)_f > \left(\rho W \right)_{fcrit} \\ 0; & \left(\rho W \right)_f < \left(\rho W \right)_{fcrit}, \end{cases} \quad (17)$$

где $\left(\rho W \right)_{fcrit} = \frac{\mu_f}{D} \exp \left(5,8504 + 0,4249 \frac{\mu_v}{\mu_f} \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_v}} \right) -$

критический расход пленки, начиная с которого существует гидродинамический унос; $\left(\rho W \right)_v = \varphi_v \rho_v W_v$ – расход пара; $\left(\rho W \right)_f = \varphi_f \rho_f W_f$ – расход пленки.

3) Модификация модели Суговары в работе Пенга [23]:

$$S_e = 1,07 \cdot \frac{W_v \mu_f \tau_{fv}}{\sigma^2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.4} \times \begin{cases} k_s, & \text{Re}_v > 10^5 \\ k_s [2,136 \lg(\text{Re}_v) - 9,68], & \text{Re} < 10^5 \end{cases} \quad (18)$$

где $k_s = 0,57\delta + 21,73 \cdot 10^3 \delta^2 - 38,3 \cdot 10^6 \delta^3 + 55,68 \times 10^9 \delta^4$; $\text{Re}_v = \frac{\rho_v W_v \varphi_v D}{\mu_v}$.

$$S_d = 5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{W_v}{\text{Re}_v^{0.2} \text{Pr}^{2/3}} \right) \left(\frac{C}{\rho_v} \right)^{-0.5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0.2} C. \quad (19)$$

4) Осаждение из работы Палеева [24], унос из модели Суговары (15):

$$S_d = 0,022 W_v \text{Re}_v^{-0,25} \left(\frac{C}{\rho_v} \right)^{-0,26} C. \quad (20)$$

5) Осаждение Хьюита [25], унос по модели Суговары (15)

$$S_d = 87 \left(\frac{\tau_{fv}}{C} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_f^2}{D \sigma \rho_f} \right)^{0,5}. \quad (21)$$

6) Унос Стевановича [26], Осаждение по модели Гована–Хьюита (17)

$$S_e = 1,1 \cdot 10^4 \delta^{2,25} \rho_f. \quad (22)$$

7) Унос и осаждение, представленные в работе Нигматулина [27]

$$S_d = 0,1 \varphi_d^{-0,16} \text{Re}_v^{-0,12} \cdot \begin{cases} F^{0,5}; & F \leq 1 \\ F; & F > 1 \end{cases}, \quad (23)$$

где $F = 0,16 \left(\frac{\sigma}{W_v \mu_v} \right) \left(\frac{\mu_v}{\mu_f} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right)^{0,26}$; $\text{Re}_v = \frac{\rho_v W_v D}{\mu_v}$.

$$S_e = \frac{A \varphi_f \rho_f W_f}{\pi D} \begin{cases} 0; & \text{We}_{vf} < \text{We}_{vf}^* \\ 91 \frac{\text{We}_{vf}}{\text{Re}_f} \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0,5}; & \text{We}_{vf} > \text{We}_{vf}^* \end{cases}, \quad (24)$$

где число Вебера и критическое число Вебера

считаются соответственно: $\text{We}_{vf} = \frac{\rho_v W_v^2 \delta}{\sigma}$;

$$\text{We}_{vf}^* = \left(\frac{\mu_f}{\mu_v} \right) \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right)^{0,5} \cdot \begin{cases} 2,5 \cdot 10^{-3} \text{Re}_f^{0,2}; & \text{Re}_f \leq 300 \\ 2,8 \cdot 10^{-5} \text{Re}_f; & \text{Re}_f > 300 \end{cases};$$

$$\text{Re}_f = \frac{\rho_f W_f \delta}{\mu_f}.$$

8) Унос из работы Уеды [28], осаждение по модели Гована–Хьюита (17):

$$S_e = \begin{cases} 3,54 \cdot 10^{-3} \chi^{0,57}; & \chi \geq 120 \\ 0; & \chi < 120 \end{cases}, \quad (25)$$

где $\chi = \frac{\tau_{vf}}{\sigma} \left(\frac{\vartheta W_f}{\sigma} \right)^{0,6}$; $\vartheta = 1 - \left(1 - \frac{2\delta}{D} \right)^2$.

9) Осаждение Палеев [24], Унос по модели Гована–Хьюита (17):

$$S_d = 0,022 W_v \text{Re}_v^{-0,25} \left(\frac{C}{\rho_v} \right)^{-0,26} C. \quad (26)$$

10) Модифицированная модель Гована–Хьюита [10]:

$$S_d = \begin{cases} 0,18153 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0.5} C; & \frac{C}{\rho_v} < 0,3 \\ 0,083 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0.5} C \left(\frac{\rho_v}{C} \right)^{0.65}; & \frac{C}{\rho_v} \geq 0,3 \end{cases}, \quad (27)$$

$$S_e = \begin{cases} (\rho W)_v 5,75 \cdot 10^{-5} \cdot a \left[(\rho W)_f - (\rho W)_{f_{crit}} \right]^2 \times \\ \times \left[\frac{D \rho_f}{\sigma \rho_v^2} \right]^b, & (\rho W)_f > (\rho W)_{f_{crit}} \\ 0; & (\rho W)_f < (\rho W)_{f_{crit}}, \end{cases} \quad (28)$$

$$\frac{We_{\delta i}^*}{\left(\frac{\mu_f}{\mu_v} \right) \left(\frac{\rho_v}{\rho_f} \right)^{0,5}} = \begin{cases} 2,5 \cdot 10^{-3} \left(\frac{Re_f}{4} \right)^{0,2}; \\ Re_f < 1200, \\ 0,7 \cdot 10^{-5} Re_f; & Re_f \geq 1200, \end{cases} \quad (32)$$

где $a = 0,18 + 0,82 \exp\left[-150 \frac{\rho_v}{\rho_f}\right]$; $b = 0,316 + 1,25 \times \left(\frac{\rho_v}{\rho_f}\right)^{0,6}$, а расходы пара $(\rho W)_v$ и пленки $(\rho W)_f$ считаются по формулам модели Гована-Хьюита.

11) Унос из работы Бертодано [29] и осаждение по модели Гована-Хьюита (17):

$$S_e = \begin{cases} \frac{\mu_f}{D} 4,47 \cdot 10^{-7} \left(We_{Dv} \left(\frac{\rho_f - \rho_v}{\rho_v} \right) \right) \times \\ \times \left(Re_f - Re_f^* \right)^{0,925} \left(\frac{\mu_v}{\mu_f} \right)^{0,26}; & Re_f \geq Re_f^*, \\ 0; & Re_f < Re_f^*, \end{cases} \quad (29)$$

где $We_{Dv} = \frac{\rho_v W_v^2 D}{\sigma}$ – число Вебера по пару;

$Re_f^* = 80$ – критическое число Рейнольдса;

$$Re_f = \frac{\varphi_f D \rho_f W_f}{\mu_f}.$$

12) Унос по модели Нигматулина [30] и осаждение по модели Гована-Хьюита (17):

$$S_e = \begin{cases} \frac{\mu_f}{\pi D (1 - \varphi_f)^{0,5}} 0,55 \left(\frac{\rho_f}{\rho_v} \right)^{0,5} \frac{(We_{\delta i} - We_{\delta i}^*)}{\Omega_f^{0,7}}; \\ We_{\delta i} \geq We_{\delta i}^*, \\ 0; & We_{\delta i} < We_{\delta i}^*, \end{cases} \quad (30)$$

где $\Omega_f = \mu_f \left(\frac{g}{\rho_f \sigma^3} \right)^{0,25}$. Число Вебера и его критическое значение считаются соответственно:

$$We_{\delta i} = \frac{\tau_{fv} \delta}{\sigma}, \quad (31)$$

$$\text{где } Re_f = \frac{\varphi_f D \rho_f W_f}{\mu_f}.$$

13) Унос из работы Алипченкова [31] и осаждение по модели Гована-Хьюита (17):

$$S_e = \begin{cases} 0,023 (\rho_f \tau_{fv})^{0,5} (We_{\delta i} - We_{\delta i}^*); \\ We_{\delta i} \geq We_{\delta i}^*, \\ 0; & We_{\delta i} < We_{\delta i}^*, \end{cases} \quad (33)$$

$We_{\delta i}$ и $We_{\delta i}^*$ рассчитываются так же, как и в предыдущем случае (38)–(39).

Модели уноса и осаждения капель с учетом пузырькового уноса

Концентрация капель C рассчитывается аналогично $C = \frac{\varphi_d \rho_d}{\varphi_v + \varphi_d}$.

1) Контрольная модель, учитывающая только гидродинамический унос – модифицированная модель Гована-Хьюита (27)–(28).

2) Комбинация моделей Уеды [32], учитывающей пузырьковый унос, и модифицированной модели Гована-Хьюита. Унос выбирается по преобладающему механизму, осаждение считается по формуле (27).

$$S_e = \max(S_{eh}, S_{eq}), \quad (34)$$

$$S_{eq} = 4,77 \cdot 10^2 \left(\frac{q_{wfi}^*}{\Delta h_s} \right)^{2,5} \left[\frac{\delta}{\sigma \rho_v} \right]^{0,75}, \quad (35)$$

где Δh_s – теплота фазового перехода; S_{eh} – рассчитывается по (28); S_d – по (27).

3) Представленная в работе Джаянти [20] модель, дополнительно учитывающая ингибирование осаждения за счет потока пара, вызванного испарением. Гидродинамический унос в этом случае считается по (28).

$$S_e = \max(S_{eh}, S_{eq}), \quad (36)$$

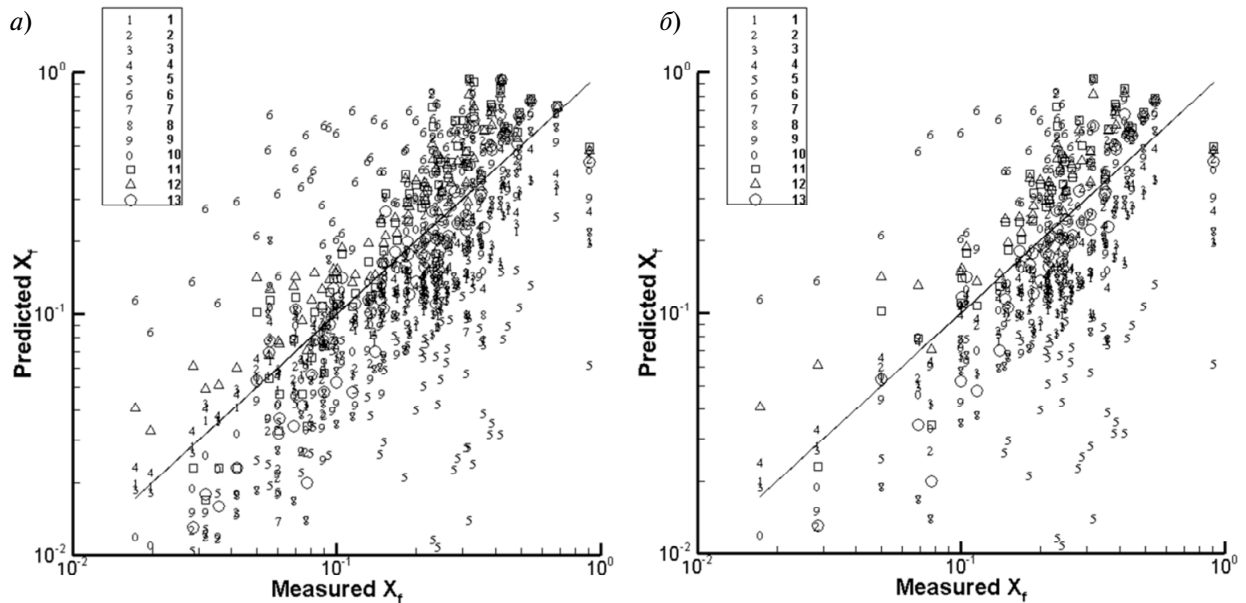


Рис. 1. Соотношение расчетной и экспериментальной расходной доли пленки (X_f) для диапазона давлений 2–10 МПа (а) и 5–10 МПа (б)

Fig. 1. The ratio of the calculated and experimental film consumption ratio (X_f) for a pressure range of 2–10 MPa (a) and 5–10 MPa (b)

$$S_{eq} = 4,77 \cdot 10^2 \left(\frac{q_{wfj}^*}{\Delta h_s} \right)^{2,5} \left[\frac{\delta}{\sigma \rho_v} \right]^{0,75}, \quad (37)$$

$$S_d = C \cdot \max((k_d - k_q); 0), \quad (38)$$

$$k_d = \begin{cases} 0,18153 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0,5}; & \frac{C}{\rho_v} < 0,3, \\ 0,083 \left(\frac{\sigma}{\rho_v D} \right)^{0,5} \left(\frac{\rho_v}{C} \right)^{0,65}; & \frac{C}{\rho_v} \geq 0,3, \end{cases} \quad (39)$$

$$k_q = \frac{1}{\sqrt{\alpha_d + \alpha_v}} \cdot 0,065 \rho_f \frac{m_{fv}}{\Pi_{if}}. \quad (40)$$

Результаты расчетов и их обсуждение
Расчеты течения в адиабатическом канале

В целях валидации и сравнительных оценок замыкающих соотношений по гидродинамическому уносу и осаждению капель на пленку, были рассчитаны режимы течения двухфазного дисперсно-кольцевого потока в адиабатическом канале, соответствующие экспериментам

из работ Рачкова и Вюртца. В работе Рачкова¹ рассматривалось течение в круглой трубе диаметром 13,3 мм и длиной 3 м, в диапазоне давлений 0,98–11,77 МПа, расходов смеси 500–2000 кг/(м²·с), массовых расходных паросодержаний 0,25–0,95. В экспериментах Вюртца [33] исследовалось течение двухфазного пароводяного потока в круглой трубе диаметром 10 мм, длиной 9 м, в диапазоне давлений 3–9 МПа, расходов смеси 500–3000 кг/(м²·с), массовых расходных паросодержаний 0,08–0,7.

Результаты расчетов представлены на рис. 1 (а, б) в виде соотношения расчетной и экспериментальной массовой расходной доли пленки X_f . На рисунках номер символа в легенде соответствует номеру варианта замыкающих соотношений для гидродинамического уноса и осаждения капель, под которым они были описаны выше.

¹ Рачков В.И. Экспериментальное исследование процессов влагообмена при течении пароводяных дисперсно-кольцевых потоков: дис. ... канд. техн. наук, 1978.

Таблица 1

Осредненные по всем экспериментам модули относительных отклонений X_f , %
 Averaged over all experiments, the modules of the relative deviations of X_f , %

P, МПа	Номер модели гидродинамического уноса и осаждения												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1–10	32,8	33,4	31,5	22,8	53,6	121	42,1	33,8	33,7	21,5	39,1	33,9	29,6
5–10	37,7	34,7	37,9	24,5	63,7	118	39,2	36,2	34,8	21,6	45,6	41,1	26,7

Таблица 2

Осредненные по всем экспериментам модули относительных отклонений массовой расходной доли пленки в зависимости от удаления от начала канала для различных моделей уноса / осаждения капель

Averaged over all experiments, the modules of the relative deviations of the mass expenditure share of the film, depending on the distance from the beginning of the channel for various models of entrainment / deposition of droplets

№ модели	Координата отбора пленки, мм								
	90	155	255	385	515	605	1665	2320	
1	10,9	15,1	20,7	25,9	28,8	27,5	32,3	29,6	
2	3,4	6,3	9,8	13,7	16,9	19,8	32,0	33,4	
3	10,8	14,9	20,4	25,2	27,6	25,9	29,8	28,4	
4	10,7	14,7	19,9	24,4	26,6	24,6	25,4	25,4	
5	11,3	16,0	22,6	29,3	33,8	34,4	55,6	60,2	
6	12,2	20,8	31,6	44,7	58,7	76,2	174,1	236,6	
7	8,4	13,0	19,2	25,9	30,4	34,5	55,1	61,9	
8	7,0	10,9	16,0	21,6	25,4	28,8	45,9	51,6	
9	3,0	5,7	9,6	14,1	18,1	20,6	38,6	42,2	
10	4,8	7,5	10,3	12,7	13,8	15,5	19,7	20,5	
11	5,4	9,6	13,7	17,1	20,9	25,9	39,8	45,4	
12	3,8	7,3	10,6	13,7	17,8	25,4	41,3	52,7	
13	13,1	16,6	20,6	24,6	26,8	26,0	29,0	28,1	

Из всего рассчитанного диапазона давлений (рис. 1, а) были выделены результаты для диапазона давлений 5–10 МПа, являющегося более близким к давлениям в парогенераторах АЭС. Для численной оценки качества прогноза на основе того или иного набора замыкающих соотношений для уноса и осаждения капель с поверхности жидкой пленки в табл. 1 представлены осредненные по всем вариантам модули относительных отклонений в %:

Как видно из табл. 1, для случая всего диапазона давлений наиболее точно предсказывает расходы в пленке модель под номером 10 (модифицированная модель Гована-Хьюита). Почти

так же на всем диапазоне давлений предсказывает модель под номером 4 (Палеев и Суговара).

В случае же рабочего диапазона давлений 5–10 МПа, лучше всего предсказывает 10 – ая модель. Модель 4 имеет меньшую точность: в среднем его данные отличаются от результатов по модели 10 примерно на 3 %. Точность остальных моделей уноса и осаждения (номера 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11, 12 и 13) в обоих случаях заметно ниже.

С целью проверки предположения о том, что отклонение расчетной массовой расходной доли пленки от экспериментальной увеличивается по длине канала, в табл. 2 представлены осредненные по всем вариантам модули отно-

сительных отклонений массовой расходной доли пленки:

Как видно из табл. 2, в целом относительное отклонение расчета от эксперимента по длине канала только увеличивается для всех представленных наборов замыкающих соотношений, описывающих гидродинамический унос и осаждения капель на поверхности жидкой пленки.

При проведении расчетов и анализе результатов было обнаружено, что существуют случаи, когда модель 10 уступает той или иной модели уноса/осаждения. Чтобы выявить диапазон начальных условий, в которых другие модели могут иметь преимущество над 10-й моделью, рассчитаем 12 выбранных экспериментов Рачкова для диапазона давлений 2,94–9,81 и разных расходов смеси (порядка 500, 1000 и 1500 кг/(м²·с)).

Рассмотрим зависимости массового расходного содержания пленки от изменения давления и расходов. В табл. 3 представлены результаты расчетов, где в ячейках таблицы при согласованности условий по расходам и давлениям представлены номера моделей, имеющие лучшую точность в каждом конкретном случае.

Таблица 3

Номер модели уноса/осаждения с наименьшим отклонением

Model number of entrainment / precipitation with the smallest deviation

Расход смеси, кг/(м ² ·с)	Давление, МПа			
	2,94	4,9	6,87	9,81
500	2	4	2	10
1000	7	10	9	9
1500	10	7	10	11

Как видно из табл. 3, систематического преимущества той или иной модели уноса/осаждения в зависимости от условий течения не наблюдается.

Расчеты течения в обогреваемом канале

Для проверки замыкающих соотношений, учитывающих пузырьковый унос, были рассчитаны эксперименты из двух литературных источников. Первый – диссертация Рачкова, в которой рассматриваются течения двухфазного пароводяного дисперсно-кольцевого потока в вертикальной круглой обогреваемой трубе с внутренним диаметром 13,1 мм, длиной 1,5 м и длиной обогреваемого участка 0,66 м. Диапазон давлений 2,94–9,81 МПа, расходов смеси 500–2000 кг/(м²·с) и массовых расходных паросодержаний 0,2–0,65. Второй – статья Милашенко [34], в которой рассматриваются течения дисперсно-кольцевого потока в круглой обогреваемой трубе диаметром 13,1 мм, с длиной рабочего участка 1,033 и 0,18 м и обогреваемой длиной, соответственно, 1 и 0,15 м. Диапазон давлений 7–10 МПа, расходов смеси 1500–3000 кг/(м²·с) и массовых расходных паросодержаний 0,23–0,33. В обеих сериях экспериментов авторы ступенчато увеличивают тепловую нагрузку, фиксируя расход пленки на выходе из рабочего участка, до тех пор, пока измеряемый расход в пленке не станет минимальным (т. е. в экспериментах реализуются случаи близости к точке высыхания). Зависимость рассчитанных массовых расходных долей пленки X_f от экспериментальных не позволяет проанализировать результаты для всех экспериментальных точек по той причине, что в некоторых случаях (в случае близости к точке высыхания в эксперименте) некоторые из моделей предсказывают высыхание еще до конца канала. Чтобы использовать данные экспериментов при высоких тепловых нагрузках, высчитывалась точка по продольной координате z_{pred} , в которой расход пленки в расчете соответствовал расходу пленки в конце канала в эксперименте. Зная длину канала в эксперименте z_{exp} можно вывести разницу координат $\Delta z_{pred} = z_{pred} - z_{exp}$, которая позволит оценить точность рассматриваемых

корреляций. Так как возможны случаи недопредсказывания уноса, то расчетная длина канала была увеличена 5 м. На рис. 2 представлены результаты таких расчетов в виде зависимостей Δz_{pred} от экспериментального массового расходного содержания пленки в конце канала (Measured X_f). Номер точки в легенде соответствует номеру модели в списке моделей, учитывающих пузырьковый унос.

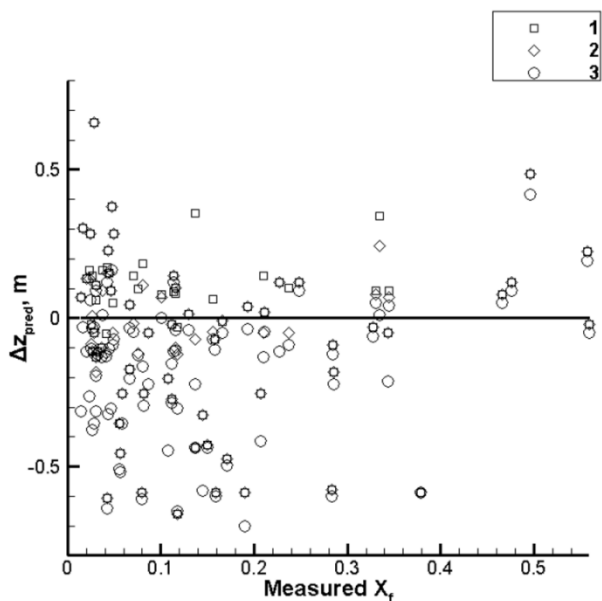


Рис. 2. Зависимость разницы координат, в которой наблюдается экспериментальный уровень расхода в пленке (Δz_{pred}) от экспериментальной расходной доли пленки в конце канала (Measured X_f)

Fig. 2. Dependence of the difference of coordinates, in which the experimental flow rate in the film (Δz_{pred}) is observed from the experimental film flow rate at the end of the channel (Measured X_f)

Чтобы проанализировать точность рассматриваемых моделей уноса и осаждения были рассчитаны средние квадратичные отклонения для всех экспериментальных точек и для точек, близких к высыханию (экспериментальное расходное содержание пленки (X_f) в конце канала меньше 0,05). Результаты представлены в табл. 4:

Таблица 4

Среднеквадратичные отклонения расчетной координаты z_{pred} от экспериментальной, м

Standard deviations of the calculated coordinate z_{pred} from the experimental, m

	Номер модели уноса/осаждения		
	1	2	3
Все эксп.	0,273	0,267	0,291
Эксп. $X_f < 0,05$	0,244	0,243	0,231

По представленным результатам (рис. 2 и табл. 4) видно, что модели, учитывающие влияние теплового потока на унос в случаях близких к высыханию пленки предсказывают ее расход немного лучше, чем модели, не учитывающие этот эффект. При этом расчет с учетом влияния потока испарения на осаждение (модель номер 3) показал себя хуже, чем, если не учитывать этот эффект (номер 2) в целом, но предсказывает немного лучше в случае тепловых потоков, близких к критическим.

Заключение

В данной работе с помощью стационарной одномерной трехжидкостной модели был проведен сравнительный анализ корреляций, описывающих унос и осаждение капель как чисто гидродинамического процесса уноса / осаждения, так и пузырькового.

Используемые литературные экспериментальные данные в случае течения в адиабатических каналах описывают течение двухфазного пароводяного дисперсно-кольцевого потока в диапазоне давлений 0,98–11,77 МПа, расходов смеси 500–3000 кг/(м²·с) и массовых расходных паросодержаний 0,08–0,95. На их основе было обнаружено, что наилучшим образом предсказывает рассматриваемые литературные данные модель под номером 10 (Модифицированная модель Гована-Хьюита).

При расчете течения дисперсно-кольцевого потока в вертикальных обогреваемых

каналах используемые литературные данные покрывают диапазон давлений 2,94–10 МПа, расходов смеси 500 – 3000 кг/(м²·с) и массовых расходных паросодержаний 0,2–0,65. Было обнаружено, что модели, учитывающие пузырьковый унос, предсказывают характеристики двухфазного потока вблизи точки высыхания немного лучше (улучшение до 5 %) (модели 2 (Уеда) и 3 (Джаянти)), чем модель, не учитывающая этого эффекта. При этом модель, учитывающая дополнительно ингибиро-

вание потока осаждения за счет потока испаряющегося пара (модель 3), предсказывает эксперимент вблизи точки высыхания лучше модели, где учитывается только пузырьковый унос (модель 2), однако уступает ей при низких тепловых нагрузках.

Работа выполнялась в рамках проекта 3.3314.2017/4.6 государственного задания Министерства образования и науки РФ на период 2017–2019 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Anglart H., Li H., Niewinski G.** Mechanistic modelling of dryout and post-dryout heat transfer // *Energy*. 2018. No. 161. P. 352–360.
- [2] **Zhang R., Liu H., Liu M.** A probability model for fully developed annular flow in vertical pipes: Prediction of the droplet entrainment // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. No. 84. P. 225–236.
- [3] **Dasgupta A., Chandraker D.K., Vishnoi A.K., Vijayan P.K.** A new methodology for estimation of initial entrainment fraction in annular flow for improved dryout prediction. *Annals of Nuclear Energy*, 75 (2015) 323–330.
- [4] **Hammouda N., Cheng Z., Rao Y.F.** A subchannel based annular flow dryout model // *Annals of Nuclear Energy*. 2016. No. 94. P. 313–324.
- [5] **Li H., Anglart H.** CFD prediction of droplet deposition in steam-water annular flow with flow obstacle effects // *Nuclear Engineering and Design*. 2017. No. 321. P. 173–179.
- [6] **Pagan E., Williams W.C., Kam S., Waltrich P.J.** A simplified model for churn and annular flow regimes in small- and large-diameter pipes // *Chemical Engineering Science*. 2017. No. 162. P. 309–321.
- [7] **Li H., Anglart H.** Prediction of dryout and post-dryout heat transfer using a two-phase CFD model // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. No. 99. P. 839–850.
- [8] **Van Eckeveld A.C., Gotfredsen E., Westerwee J., Poelma C.** Annular two-phase flow in vertical smooth and corrugated pipes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2018. No. 109. P. 150–163.
- [9] **Лаптев А.Г., Лаптева Е.А.** Моделирование массоотдачи в многокомпонентных и бинарных смесях в режиме сильного взаимодействия фаз при пленочном течении в каналах // *Труды академэнерго*. 2017. № 4. С. 24–32.
- [10] **Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А.** Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // *Теплоэнергетика*. 2002. № 11. С. 22–28.
- [11] **Alves M.V.C., Waltrich P.J., Gessner T.R., Falcone G., Barbosa J.R.** Modeling transient churn-annular flows in a long vertical tube // *International Journal of Multiphase Flow*. 2017. No. 89. P. 399–412.
- [12] **Bae B., Kim T., Jeong J., Kim K., Yun B.** 4. *Progress in Nuclear Energy*. 2018. No. 109. P. 45–52.
- [13] **Shi J., Sun B., Zhang G., Song F., Yang L.** Prediction of dryout and post-dryout wall temperature at different operating parameters for once-through steam generators // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. No. 103. P. 66–76.
- [14] **Heinze D., Schulenberg T., Behnke L.** A physically based, one-dimensional three-fluid model for direct contact condensation of steam jets in flowing water // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. No. 106. P. 1041–1050.
- [15] **Dalir N., Saffari H.** Influence of variation of pipe diameter on pressure drop predictions of the new modified three-fluid model inside condensing vertical pipes // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2014. No. 230 (1). P. 36–44.
- [16] **Han W., Li Y., Shi J., Sun B., Zhang G., Yang L.** Numerical simulation of dryout and post-dryout heat transfer in a straight-pipe once-through steam generator // *Applied Thermal Engineering*. 2016. No. 105. P. 132–141.



- [17] **Zhang P., Shi J., Yu X., Sun B., Song F.** Modeling the full-range thermal-hydraulic characteristics and post-dryout deviation from thermodynamic equilibrium in once-through steam generators. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109 (2017) 266–277.
- [18] **Deng H., Fernandino M., Doraо С.А.** Modeling of annular-mist flow during mixtures boiling // *Applied Thermal Engineering*. 2015. No. 91. P. 463–470.
- [19] **Авдеев Е.Э., Плетнев А.А., Булович С.В.** Трехжидкостная формулировка и численный метод решения стационарной задачи теплогидравлики двухфазного потока в дисперсно-кольцевом режиме течения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2018. № 11 (3). С. 122–132.
- [20] **Jayanti S., Valette M.** Prediction of dry-out and postdry-out heat transfer at high pressures using one-dimensional three-fluid model // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. No. 47 (22). P. 4895–4910.
- [21] **Sugowara S.** Droplet deposition and entrainment modeling based on the three-fluid model // *Nuclear Engineering and Desing*. 1990. No. 122 (1). P. 62–84.
- [22] **Govan A.H., Hewitt G.F.** Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change // *International journal of heat and mass transfer*. 1990. No. 33(2). P. 229–242.
- [23] **Peng S.W.** Heat flux effect on the droplet entrainment and deposition in annular flow dryout // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2008. No. 13. P. 2223–2235.
- [24] **Paleev L.I., Filippovicw B.S.** Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow // *International journal of heat and mass transfer*. 1966. No. 9(10). P. 1089–1093.
- [25] **Hewitt G.F.** Pressure drop, in G. Hetsroni (ed.-in-chief), *Handbook of Multiphase Systems*. Hemisphere. New York. 1982. P. 2.71–2.73.
- [26] **Stevanovic V., Stanojevic M., Radic D.** Three-fluid model predictions of pressure changes in condensing vertical tubes // *International journal of heat and mass transfer*. 2008. No. 51(15). P. 3736–3744.
- [27] **Nigmatulin R.I., Knodzhaev Ya.D., Kroshilin V.E.** Entrainment and deposition rates in a dispersed-film flow. *International journal of multiphase flow*. 22(1) (1996) 19–30.
- [28] **Ueda T.** Entrainment rate and size of entrained droplets in annular two-phase flow // *Bulletin of JSME*. 1979. No. 22 (171). P. 1258–1265.
- [29] **Lopez de Bertodano M.A., Assad A.** Entrainment Rate of Droplets in the Ripple-Annular Regime for Small Vertical Ducts // *Nuclear Sci. and Eng.* 1998. No. 129 (1). P. 72–80.
- [30] **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 360 с.
- [31] **Алипченков В.М., Зайчик Л.И., Зейгарник Ю.А., Соловьев С.Л., Стоник О.Г.** Развитие трехжидкостной модели двухфазного потока для дисперсно-кольцевого режима течения в каналах. Осаждение и унос капель // *ТВТ*. 2002. № 40(5). С. 772–778.
- [32] **Ueda T., Inoue M., Nagatome S.** Critical heat flux and droplet entrainment rate in boiling of falling liquid films // *International journal of heat and mass transfer*. 1981. No. 24(7). P. 1257–1266.
- [33] **Wurtz J.** An experimental and theoretical investigation of annular steam-water flow in tubes and annuli at 30 to 90 bar // *Technical university of Denmark*. 1978. No. 372.
- [34] **Milashenko V.I., Nigmatulin B.I., Petukhov V.V., Trubkin N.I.** Burnout and distribution of liquid in evaporative channels of various lengths. *International journal of heat and mass transfer*. 15(3) (1989) 393–401.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

АВДЕЕВ Евгений Эдуардович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: avdeev-evgeni@yandex.ru

БУЛОВИЧ Сергей Валерьевич – кандидат физико-математических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: bulovic@yandex.ru

ГОРСКИЙ Юрий Александрович – аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: iurii.gorskii@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 20.03.2019

REFERENCES

- [1] **H. Anglart, H. Li, G. Niewinski**, Mechanistic modelling of dryout and post-dryout heat transfer, *Energy*, 161 (2018) 352–360.
- [2] **R. Zhang, H. Liu, M. Liu**, A probability model for fully developed annular flow in vertical pipes, Prediction of the droplet entrainment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84 (2015) 225–236.
- [3] **A. Dasgupta, D.K. Chandraker, A.K. Vishnoi, P.K. Vijayan**, A new methodology for estimation of initial entrainment fraction in annular flow for improved dryout prediction, *Annals of Nuclear Energy*, 75 (2015) 323–330.
- [4] **N. Hammouda, Z. Cheng, Y.F. Rao**, A subchannel based annular flow dryout model, *Annals of Nuclear Energy*, 94 (2016) 313–324.
- [5] **H. Li, H. Anglart**, CFD prediction of droplet deposition in steam-water annular flow with flow obstacle effects, *Nuclear Engineering and Design*, 321 (2017) 173–179.
- [6] **E. Pagan, W.C. Williams, S. Kam, P.J. Waltrich**, A simplified model for churn and annular flow regimes in small- and large-diameter pipes, *Chemical Engineering Science*, 162 (2017) 309–321.
- [7] **H. Li, H. Anglart**, Prediction of dryout and post-dryout heat transfer using a two-phase CFD model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99 (2016) 839–850.
- [8] **A.C. Van Eckveld, E. Gotfredsen, J. Westerwee, C. Poelma**, Annular two-phase flow in vertical smooth and corrugated pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, 109 (2018) 150–163.
- [9] **A.G. Laptev, Ye.A. Lapteva**, Modelirovaniye massootdachi v mnogokomponentnykh i binarnykh smesyakh v rezhime silnogo vzaimodeystviya faz pri plenochnom techenii v kanalakh, *Trudy akademenergo*, 4 (2017) 24–32.
- [10] **Yu.V. Yudov, S.N. Volkova, Yu.A. Migrov**, Closure relations of the thermal-hydraulic model of the calculation code KORSAR, *Teploenergetika*, 11 (2002) 22–28.
- [11] **M.V.C. Alves, P.J. Waltrich, T.R. Gessner, G. Falcone, J.R. Barbosa**, Modeling transient churn-annular flows in a long vertical tube, *International Journal of Multiphase Flow*, 89 (2017) 399–412.
- [12] **B. Bae, T. Kim, J. Jeong, K. Kim, B. Yun**, 4. *Progress in Nuclear Energy*, 109 (2018) 45–52.
- [13] **J. Shi, B. Sun, G. Zhang, F. Song, L. Yang**, Prediction of dryout and post-dryout wall temperature at different operating parameters for once-through steam generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 103 (2016) 66–76.
- [14] **D. Heinze, T. Schulenberg, L. Behnke**, A physically based, one-dimensional three-fluid model for direct contact condensation of steam jets in flowing water. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106 (2017) 1041–1050.
- [15] **N. Dalir, H. Saffari**, Influence of variation of pipe diameter on pressure drop predictions of the new modified three-fluid model inside condensing vertical pipes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 230 (1) (2014) 36–44.
- [16] **W. Han, Y. Li, J. Shi, B. Sun, G. Zhang, L. Yang**, Numerical simulation of dryout and post-dryout heat transfer in a straight-pipe once-through steam generator, *Applied Thermal Engineering*, 105 (2016) 132–141.
- [17] **P. Zhang, J. Shi, X. Yu, B. Sun, F. Song**, Modeling the full-range thermal-hydraulic characteristics and post-dryout deviation from thermodynamic equilibrium in once-through steam generators, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 109 (2017) 266–277.
- [18] **H. Deng, M. Fernandino, C.A. Dorao**, Modeling of annular-mist flow during mixtures boiling, *Applied Thermal Engineering*, 91 (2015) 463–470.
- [19] **A. Avdeev, P. Pletnev, B. Bulovich**, Three-fluid formulation and a numerical method for solving the stationary problem of thermal hydraulics of a two-phase annular dispersed flow, *St. Petersburg polytechnic university journal. Physics and Mathematics*, 11 (3) (2018) 122–132.
- [20] **S. Jayanti, M. Valette**, Prediction of dry-out and postdry-out heat transfer at high pressures using one-dimensional three-fluid model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (22) (2004) 4895–4910.
- [21] **S. Sugowara**, Droplet deposition and entrainment modeling based on the three-fluid model, *Nuclear Engineering and Design*, 122 (1) (1990) 62–84.
- [22] **A.H. Govan, G.F. Hewitt**, Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change, *International journal of heat and mass transfer*, 33 (2) (1990) 229–242.
- [23] **S.W. Peng**, Heat flux effect on the droplet entrainment and deposition in annular flow dryout, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 13 (2008) 2223–2235.



- [24] **L.I. Paleev, B.S. Filippov**, Phenomena of liquid transfer in two-phase dispersed annular flow, *International journal of heat and mass transfer*, 9 (10). (1966) 1089–1093.
- [25] **G.F. Hewitt**, Pressure drop, in G. Hetsroni (ed.-in-chief), *Handbook of Multiphase Systems*. Hemisphere, New York, (1982) 2.71–2.73.
- [26] **V. Stevanovic, M. Stanojevic, D. Radic**. Three-fluid model predictions of pressure changes in condensing vertical tubes, *International journal of heat and mass transfer*, 51 (15) (2008) 3736–3744.
- [27] **R.I. Nigmatulin, YA.D. Knodzhaev, V.E. Kroshilin**, Entrainment and deposition rates in a dispersed-film flow, *International journal of multiphase flow*, 22 (1) (1996) 19–30.
- [28] **T. Ueda**, Entrainment rate and size of entrained droplets in annular two-phase flow, *Bulletin of JSME*, 22 (171) (1979) 1258–1265.
- [29] **M.A. Lopez de Bertodano, A. Assad**, Entrainment Rate of Droplets in the Ripple-Annular Regime for Small Vertical Ducts, *Nuclear Sci. and Eng.*, 129 (1) (1998) 72–80.
- [30] **R.I. Nigmatulin**, The dynamics of multiphase environments. Ch. 2. M.: Nauka, 1987.
- [31] **V.M. Alipchenkov, L.I. Zaychik, Yu.A. Zeygarnik, S.L. Solovyev, O.G. Stonik**, Development of a three-fluid model of a two-phase flow for a dispersed-annular flow regime in channels. Deposition and entrainment of droplets, *TPHT*, 40 (5) (2002) 772–778.
- [32] **T. Ueda, M. Inoue, S. Nagatome**, Critical heat flux and droplet entrainment rate in boiling of falling liquid films, *International journal of heat and mass transfer*, 24 (7) (1981) 1257–1266.
- [33] **J. Wurtz**, An experimental and theoretical investigation of annular steam-water flow in tubes and annuli at 30 to 90 bar, *Technical university of Denmark*, 372 (1978).
- [34] **V.I. Milashenko, B.I. Nigmatulin, V.V. Petukhov, N.I. Trubkin**, Burnout and distribution of liquid in evaporative channels of various lengths, *International journal of heat and mass transfer*, 15 (3) (1989) 393–401.

THE AUTHORS

AVDEEV Evgenii E. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: avdeev-evgeni@yandex.ru

BULOVICH Sergii V. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: bulovic@yandex.ru

GORSKIY Yurii A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: iurii.gorskii@gmail.com

Received: 20.03.2019