

УДК 532.546.2

КРИТИЧЕСКОЕ ИСТЕЧЕНИЕ ПАРОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЙ СЛОЙ

© 2021 г. Д. П. Храмцов^{1, 2, *}, Б. Г. Покусаев^{1, 2}, Д. А. Некрасов^{1, 2}, А. В. Вязьмин¹¹ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», Москва, Россия²ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва, Россия

*E-mail: dp@khramtsov.net

Поступила в редакцию 28.07.2020 г.

После доработки 11.10.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Выполнено опирающееся на ранее проведенные экспериментальные исследования численное моделирование процесса критического истечения парожидкостного потока в каналах цилиндрической формы, заполненных слоем шаровых частиц. Процесс характеризуется резким вскипанием жидкости и изменением теплогидравлических свойств потока. Рассмотрены шаровые засыпки с частицами диаметром 2, 4 и 8 мм и длинами слоя 250 и 355 мм. Изучено влияние материала и температуры засыпки на интенсификацию парообразования и профили паросодержания по сечению канала. Получены данные по критическому расходу, скорости звука для различных конфигураций системы в зависимости от диаметра частиц, длины слоя шаровых частиц, их материала и уровня начального паросодержания. Выполнена оценка скорости звука при газодинамическом заперении парожидкостного потока, значения которой находятся в области между термодинамически равновесной и замороженной скоростями звука.

DOI: 10.31857/S0040364421020058

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду широкого распространения в промышленности энергетического оборудования, работающего при высоких давлениях с эффектами тепломассопереноса и фазовых переходов в двухфазных потоках [1], задача моделирования процессов в таких потоках является актуальной. Особенно важно понимание этих процессов в условиях аварийных ситуаций при нарушении герметичности реакторов и теплообменных аппаратов и различных температурных режимов их работы [2].

Аварийной ситуацией для ядерных реакторов является разгерметизация рабочего участка с последующим истечением парожидкостного потока и возможной реализацией эффекта газодинамического заперения, при котором увеличение перепада давления не приводит к дальнейшему росту расхода смеси [3]. Потенциальное проявление этого эффекта не ограничено ядерными реакторами и может иметь место при работе аппаратов криогенной техники [4], аварийных ситуациях на вентиллях высокого давления [5] и аппаратах химической промышленности, в частности при работе каталитических реакторов и при переработке нефтепродуктов в процессе их гидроочистки [6].

При исследовании критических потоков основное внимание уделяется рассмотрению задачи критического истечения из свободного канала [7]. Однако существует класс задач, где критический

поток реализуется при истечении из канала, заполненного зернистой засыпкой. Подобные ситуации могут возникать в ядерной энергетике при аварийной разгерметизации перспективных реакторов, в которых охлаждающая жидкость протекает через слой микротрещин [8, 9]. При этом процесс вскипания жидкости при истечении из канала высокого давления [10] и тепловые свойства шаровой засыпки оказывают влияние на теплофизические параметры критического потока [11].

Экспериментально случай критического истечения парожидкостной смеси из канала с зернистой засыпкой рассматривался в [12], где были получены данные по критическим расходам парожидкостной смеси при различных паросодержаниях и геометрических параметрах засыпки. Также был предложен метод расчета основных характеристик критических потоков в зернистых засыпках [13], таких как массовый расход, коэффициент скольжения фаз. В [14] детально рассмотрена гидравлическая и газодинамическая модели по определению падения давления такого потока при течении в зернистой засыпке.

Динамика движения многофазных потоков, в том числе задачи истечения в газо- и парожидкостных системах, а также вопросы, связанные с определением локальных скоростей звука в таких средах, рассматривались в [15]. Наличие паровой

фазы в жидкости может приводить к низкой скорости звука в среде, соответствующей термодинамически равновесной скорости звука [15]. Здесь такая скорость звука была реализована в зернистой среде. Добавление зернистой засыпки оказывает влияние на парожидкостный поток, приводя, по-видимому, к гомогенизации потока и, как следствие, к удовлетворению одному из условий, которое соответствует расчетам скорости звука Ландау [16].

Критическое истечение парожидкостного потока характеризуется сложными теплофизическими процессами, связанными с изменением структуры потока, наличием фазовых переходов, гидродинамического и теплофизического взаимодействия двухфазного потока с шаровой засыпкой. Для исследования влияния акустических эффектов на процесс критического истечения нужна информация о локальных характеристиках потока. Ввиду ограниченности данных, которые возможно получить при экспериментальном исследовании такой сложной задачи, необходим численный анализ. При этом особенный интерес представляет моделирование задачи в трехмерной постановке. Ряд численных моделей был развит для изучения критических потоков, в частности, для расчета потерь теплоносителя в случае аварийной разгерметизации охлаждающего контура атомного реактора [17].

Распространенным подходом для численного моделирования критических двухфазных потоков является использование гомогенной равновесной модели [18]. Модель предполагает равновесное состояние фаз [19], при этом их скорости считаются одинаковыми и не учитывается возможность скольжения фаз. Это приводит к существенным погрешностям при оценке давления в условиях реализации критического потока. Равновесная модель с запаздыванием позволяет наиболее точно описать критический поток [20] и может быть использована для оценки потерь теплоносителя при аварийной разгерметизации охлаждающего контура ядерного реактора.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Решение предлагаемой модели с учетом негомогенности среды базируется на методе сглаженных частиц [21, 22], который относится к классу бессеточных Лагранжевых методов. Благодаря реализации численной модели в трехмерной постановке стали возможными не только получение основных характеристик критических парожидкостных потоков, но и визуализация полей температур, давления и распределения фаз по каналу с учетом взаимодействия парожидкостного потока с зернистой засыпкой.

Для определения критического массового расхода пароводяной смеси через зернистую засыпку была использована экспериментальная установка “Высокотемпературный контур” [11]. Основной частью установки служит заполненный зернистой засыпкой рабочий участок, который расположен вертикально и подключен к трубе большого диаметра, что позволяет увеличить массовый расход.

Перепад давления фиксировался как разница показаний датчиков в начале и конце рабочего участка. Измерение объема парожидкостной смеси, поступившей из рабочего участка, определялось после истечения всего тестового объема в открытую среду. Порозность в эксперименте составила 0.37. Для фиксации засыпки в пределах рабочего участка по его краям были установлены металлические удерживающие сетки. При разработке численной модели ставилась цель максимально близко воспроизвести параметры засыпки в экспериментальном исследовании [11]. Также модель позволяет учитывать теплообменные и теплофизические свойства засыпки. Упаковка шаровой засыпки в модели формировалась путем создания набора различных комбинаций укладки шаров в случайном порядке с последующим выбором конфигурации укладки, наиболее близкой по показателю порозности к эксперименту. В модели не учитывалась особенность изменения порозности непосредственно у стенки.

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ

В процессе фильтрации критического потока через зернистую насадку необходимо определение влияния геометрических параметров насадки на характеристики критического потока. В [11] на основе экспериментальных данных была получена зависимость критического массового расхода от безразмерного геометрического фактора $\sqrt{d/H}$, где d – диаметр шарового элемента засыпки, H – длина зернистого слоя. Эта зависимость позволяет установить влияние диаметра частиц и длины слоя на значение критического массового расхода. В экспериментальном исследовании рассматривались частицы диаметром 2 и 4 мм. В расчетной модели дополнительно был исследован случай с засыпкой частиц диаметром 8 мм, таким образом были получены новые данные по критическому расходу парожидкостной смеси для диаметра шаровой засыпки, недоступной в экспериментальном исследовании. Длина слоя насадки составила 250 и 355 мм для всех диаметров частиц засыпки как в эксперименте, так и в расчетной модели. Зависимость демонстрирует линейный характер, при этом критический расход убывает с ростом длины слоя насадки и уменьшением диаметра частиц засыпки. Зависимость критического расхода от безразмерного

геометрического параметра на рис. 1 демонстрирует линейный монотонно убывающий характер, соответствующий эксперименту. Условия численного расчета соответствовали следующим параметрам: начальное давление воды на входе в рабочий участок $P_1 = 0.9$ МПа, массовая скорость потока $\rho w = 550$ кг/(м² с), порозность засыпки $m = 0.38$, диаметр шаровой засыпки $d = 4$ мм.

Как видно из рис. 1, все расчетные точки лежат ниже экспериментальных. Расчет показал, что совпадение с экспериментом достигается при начальном паросодержании 0.0482, а оценка абсолютной погрешности определения начального паросодержания относительно численного расчета и экспериментального исследования составила 0.002. При этом методика в эксперименте [11] позволяет с достаточно высокой точностью проводить измерения расхода. В отношении численной модели погрешность может быть связана с неточностями при вычислениях функции сглаживающего ядра. Таким образом, данная погрешность обусловлена наложением погрешностей эксперимента и численного моделирования. Как видно, уменьшение диаметра зерна засыпки и увеличение длины слоя насадки приводит к уменьшению критического расхода.

Уменьшение диаметра зерна засыпки ведет к уменьшению диаметра каналов, формирующихся между зернами засыпки, что в совокупности с увеличением длины насадки приводит к изменению гидравлического сопротивления засыпки и степени ее влияния на процесс критического истечения. Подробный анализ гидравлической и газодинамической моделей сопротивления двухфазного потока в зернистом слое выполнен в [14]. В данной работе задача критического истечения парожидкостного потока в зернистой среде рассматривается с точки зрения роли акустических эффектов.

Имеющиеся экспериментальные и расчетные данные по скорости звука в двухфазной среде, в том числе при наличии зернистой засыпки, устанавливают взаимосвязь между скоростью звука и объемным паросодержанием [11]. Таким образом, для сопоставления расчетов по критическому расходу и связанной с ним скоростью звука необходим переход от массового паросодержания к объемному. В двухфазной среде [11] подобный переход возможен через плотности жидкой и паровой фаз и коэффициент скольжения фаз:

$$\varphi = \left[1 + s \frac{\rho''(1-x)}{\rho'x} \right],$$

где φ – объемное паросодержание, s – коэффициент скольжения фаз, ρ'' – плотность пара, x – массовая доля пара в смеси, ρ' – плотность жидкости.

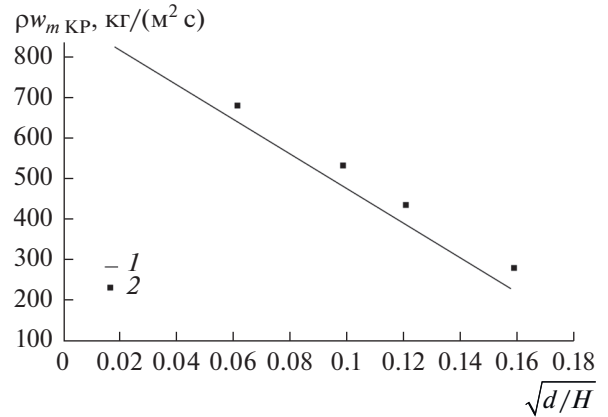


Рис. 1. Критический расход в зависимости от безразмерного геометрического параметра $\sqrt{d/H}$: 1 – расчет, 2 – эксперимент [11].

Ввиду того что для перехода от массового паросодержания к объемному используется коэффициент скольжения, появляется необходимость реализации расчета коэффициента скольжения в численной модели. Существуют аналитические подходы к определению этой величины [12]. Если в расчетной модели основные физические параметры двухфазной системы, такие как давление, плотность, скорость, рассчитываются явно путем численного решения соответствующих гидродинамических уравнений, то коэффициент скольжения определяется как отношение скорости движения паровой фазы w'' к скорости жидкой фазы w' :

$$s = \frac{w''}{w'}.$$

Для расчета коэффициента скольжения методом сглаженных частиц определялись изолированные области паровой фазы, для которых рассчитывалась скорость движения как средняя скорость движения ансамбля сглаженных частиц, формирующих данную паровую область:

$$w'' = \frac{1}{N} \sum_i w_i''.$$

Здесь i – индекс сглаженной частицы паровой фазы, N – количество сглаженных частиц в выбранной области.

Для сглаженных частиц жидкой фазы, границах с соответствующими сглаженными частицами паровой области, скорости движения рассчитываются аналогично:

$$w' = \frac{1}{N} \sum_i w_i'.$$

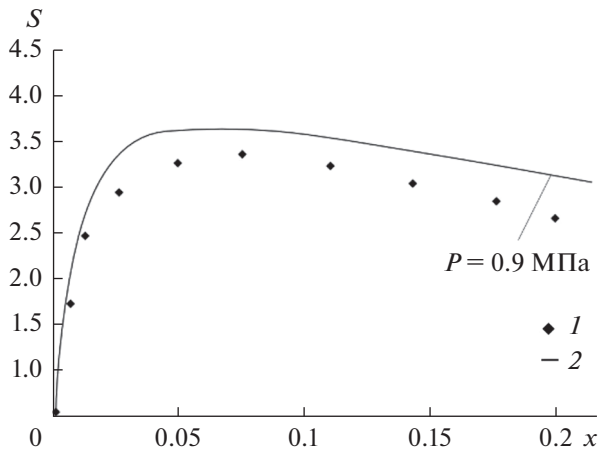


Рис. 2. Зависимость коэффициента скольжения от массового паросодержания: 1 — численный расчет, 2 — аналитический расчет [11]; $P_1 = 0.9$ МПа, $\rho_w = 550$ кг/(м² с), $m = 0.38$, $d = 4$ мм.

Для давления на входе в канал (0.9 МПа), соответствующего эксперименту [11], рассчитано значение коэффициента скольжения парожидкостной смеси с массовым паросодержанием от нуля для чистой жидкости до 0.2 (рис. 2).

Различие в значениях коэффициента скольжения, полученных численно и на основе данных [15], становится заметным при $x > 0.15$. Точная оценка коэффициента скольжения затруднена в связи со сложностью поведения двухфазных потоков, особенно при наличии зернистой засыпки и фазовых переходов. В [12] коэффициент скольжения определялся регрессионным методом на основе массива экспериментальных данных. В расчетной модели определение коэффициента скольжения основано на расчете скоростей движения области паровой фазы и граничащей с ней области жидкости. При этом возникает вопрос о точном определении границы раздела жидкость—пар в условиях пространственной и временной эволюции формы дисперсных включений паровой фазы вследствие контакта с зернистой засыпкой и постоянным новым парообразованием. В подобных условиях возможна лишь приблизительная оценка коэффициента скольжения на основе осредненных данных.

В рамках численного моделирования рассматривается случай прохождения парожидкостной смеси через слой стальных шариков, находящихся при температуре окружающей среды (293 К), что соответствует недогреву в 155 градусов до температуры насыщения для давления поступающей в рабочий участок смеси при 0.9 МПа. Также были рассмотрены два случая, когда температура шаровой засыпки соответствовала температуре парожидкостного потока при 0.9 МПа (400 К)

и имелось тепловыделение шаровой засыпки (тепловой поток $q_v = 200$ кВт/м²). Далее представляет интерес определение влияния теплофизических свойств засыпки на процесс парообразования в рабочем участке, поскольку режим течения и динамические характеристики потока зависят от доли поглощенного тепла элементами засыпки.

В численном эксперименте было выбрано четыре материала засыпки: сталь, свинец, боросиликатное стекло и эбонит. Подобный выбор позволяет охватить широкий спектр значений теплопроводности. При этом указанные выше материалы уже исследовались при численном моделировании одиночной сферы, омываемой парожидкостным потоком. В качестве стали выбрана коррозионно-стойкая сталь марки 08X18H10T ввиду ее широкого использования в энергетическом оборудовании [23].

Проведена серия вычислительных экспериментов по определению выходного паросодержания при различных материалах засыпки для исходных массовых паросодержаний 0.05 и 0.2, длинах рабочих участков 250 и 355 мм и диаметрах частиц засыпки 2 и 4 мм. Рассмотрены случаи недогрева засыпки ($\Delta T < 0$), отсутствия недогрева ($\Delta T = 0$) и наличия теплового потока между засыпкой и парожидкостной смесью (q_v).

Присутствие в канале засыпки с температурой, равной начальной температуре потока, приводит к некоторому увеличению выходного паросодержания для частиц диаметром 2 и 4 мм по сравнению со случаем недогрева, что, по-видимому, связано с термогазодинамическими эффектами парожидкостного потока в канале, где накладывается процесс теплообмена от потока к шаровой засыпке. В случае начального недогрева элементов зернистого слоя конечное паросодержание уменьшается, поскольку на термогазодинамические эффекты парожидкостной смеси в канале накладывается влияние поглощения части тепла из потока на прогрев шаровой засыпки. Однако анализ расчетов показал, что на конечное паросодержание оказывают большее влияние геометрические параметры засыпки, чем теплофизические свойства материалов.

Применение модели в трехмерной постановке позволило рассчитать распределение паросодержания по сечению канала на входе в рабочий участок (рис. 3), на расстоянии 100 мм от входа (рис. 4) и на выходе из рабочего участка на расстоянии 355 мм (рис. 5). Для получения распределения паросодержания по сечению участок в расчетной области разбивался на секции равной ширины (по 2 мм, показаны столбиками на графиках), соответствующие изменению паросодержания в течение 5 мс. Сплошными линиями здесь представлены осредненные значения паросодержаний. В качестве базового (столбика) рассматривался

случай недогрева шаровой засыпки, соответствующий по [11] 155 градусам. Для сравнения рассмотрены также случаи без недогрева и с перегревом, предельный уровень которого составлял примерно 240 градусов, что соответствует тепловому потоку порядка $q_v = 200 \text{ кВт/м}^2$, характерному для реакторов на основе микротвэлов [7]. Условия численного расчета соответствовали следующим параметрам: начальное давление воды на входе в рабочий участок – 0.9 МПа, массовая скорость потока – $550 \text{ кг/(м}^2 \text{ с)}$, материал засыпки – сталь, порозность засыпки – 0.38, диаметр шаровой засыпки – 4 мм.

В результате расчета получено, что на входе в рабочий участок наблюдается концентрирование пара в центре канала (рис. 3), при этом в случае начального паросодержания 0.05 область повышенной концентрации пара по сечению меньше (рис. 3а) по сравнению с паросодержанием 0.2 (рис. 3б). Это может быть связано с тем, что высокое начальное паросодержание приводит к более

равномерному распределению пара по каналу. При отсутствии недогрева массовая доля пара возрастает в обоих случаях.

Перегрев ведет к увеличению паросодержания, однако разница со случаем отсутствия недогрева незначительна и составляет около 5%. Это может быть связано с тем, что распределение пара рассчитывается на расстоянии 10 мм от начала рабочего участка после 5 мс с начала вычислительного эксперимента, т.е. учитываются процессы на начальном участке (прогрев, вскипание).

Дальнейшее движение парожидкостной смеси по каналу сопровождается парообразованием, и на расстоянии 100 мм от начала рабочего участка пар уже распределен по всему сечению. Распределение пара по сечению достаточно стохастично, за исключением границы со стенкой, где наблюдается минимум паросодержания как в случае начальной массовой доли пара 0.05 (рис. 4а), так и при 0.2 (рис. 4б). В случае $x = 0.2$ распределение пара по сечению более равномерное. Отсутствие

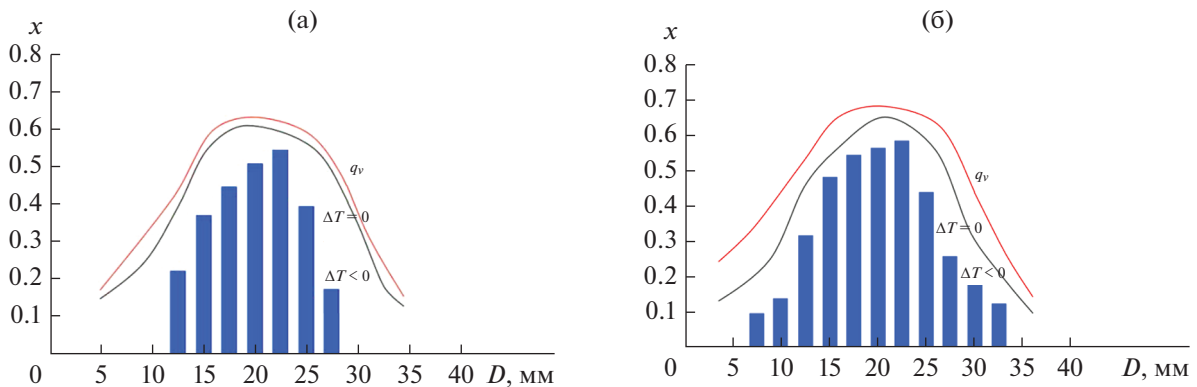


Рис. 3. Распределение массовой доли пара по сечению канала в начале рабочего участка при $L = 10 \text{ мм}$: (а) – $X_{\text{нач}} = 0.05$, (б) – 0.2 ; время от начала истечения в рабочий участок $\tau = 5 \text{ мс}$.

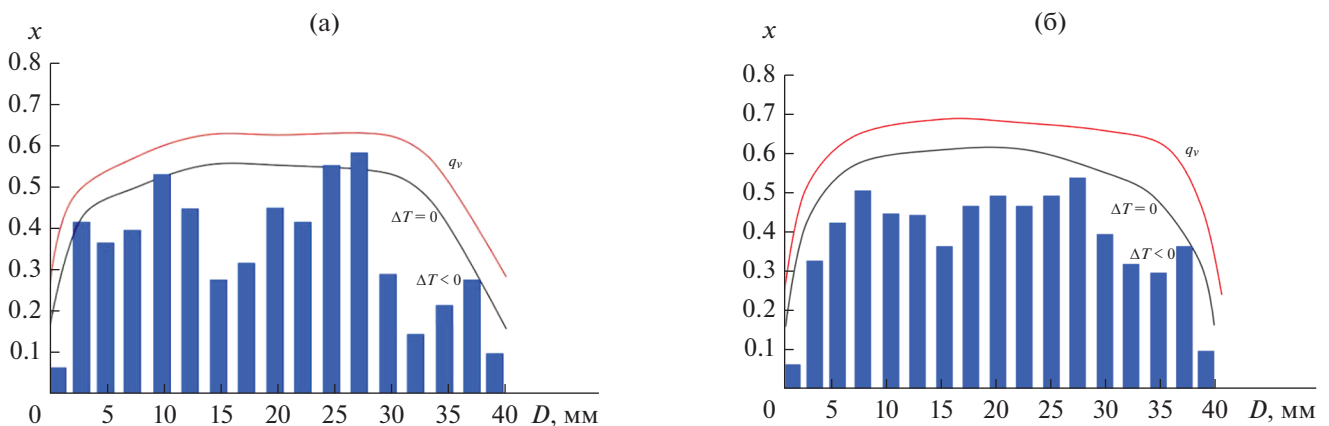


Рис. 4. Распределение массовой доли пара по сечению канала при $L = 100 \text{ мм}$ от начала рабочего участка: (а) – $X_{\text{нач}} = 0.05$, (б) – 0.2 ; $\tau = 28 \text{ мс}$.

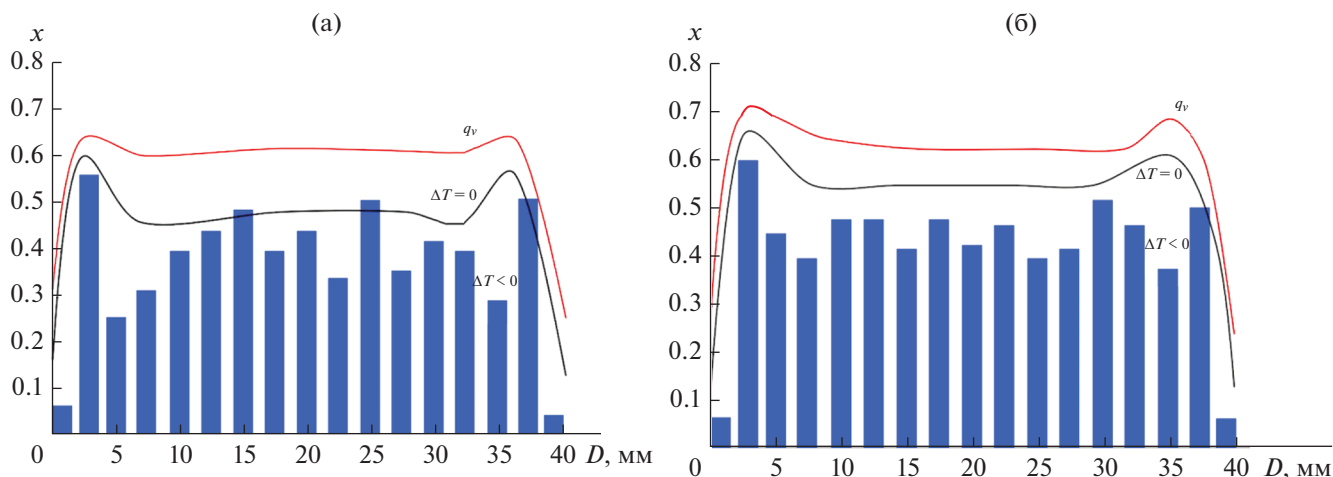


Рис. 5. Распределение массовой доли пара по сечению канала в конце рабочего участка при $L = 355$ мм: (а) – $X_{нач} = 0.05$, (б) – 0.2 ; $\tau = 87$ мс.

недогрева приводит в обоих случаях к выравниванию распределения пара по сечению. Структура распределения пара при перегреве аналогична случаю отсутствия недогрева, однако разница в паросодержании уже более существенна по сравнению с начальным сечением (рис. 3) и составляет 10%. Во всех случаях (недогрев, отсутствие недогрева, перегрев) минимум паросодержания наблюдается на границах канала.

В конце рабочего участка наблюдается формирование устойчивой структуры парораспределения с минимумами у стенок с последующим максимумом, после которого следует равномерное распределение пара по сечению. В случае начальной массовой доли пара 0.05 структура его распределения характеризуется большей нерегулярностью (рис. 5а) по сравнению с паросодержанием $x = 0.2$ (рис. 5б). Приведенная форма распределения характерна для всех трех рассмотренных случаев, при этом в случае недогрева переход от минимума к максимуму паросодержания у стенок наиболее выражен с последующим снижением этой разницы при переходе к случаю отсутствия недогрева и перегрева.

Известно, что в случае движения двухфазных потоков в трубах могут реализоваться различные режимы течения. Объемные паросодержания в рассматриваемой задаче находятся в диапазоне $0.3 < \phi < 0.8$. Для этого диапазона при свободном всплытии газовой фазы в трубе, заполненной жидкостью, как правило, реализуется снарядный режим течения. Подобный режим течения также наблюдался авторами в экспериментальных исследованиях при движении крупных пузырей в трубах и в зернистой среде, но в условиях свободного всплытия пузыря. В этом случае имеет место сложная форма пузыря в процессе его движения через зернистый слой. Объемное газосодержание

в этих экспериментах в предельном случае составила 0.32, что сопоставимо с рассматриваемым в данной задаче диапазоном.

Однако анализ распределения пара по сечению канала показал, что в нем формируется квазигомогенизированный поток (рис. 3–5) с достаточно однородным распределением пара по всему сечению. Это позволяет сделать вывод, что в рассмотренных в работе условиях при критическом истечении парожидкостного потока через зернистую засыпку снарядный режим течения не реализуется, а зернистый слой приводит к дополнительному перемешиванию потока и повышению его однородности (гомогенизации).

В экспериментах [15, 24] по определению скорости звука в двухфазных потоках в зернистом слое показана возможность реализации в подобном потоке скорости звука, соответствующей низкочастотной скорости звука Ландау [24]. При критическом истечении рассчитаем критическую скорость на основе критического массового расхода, которую рассматриваем как скорость звука парожидкостной среды, связанной с ее сжимаемостью в данном сечении. Расчетные значения скоростей звука для парожидкостных потоков в канале с зернистой засыпкой при начальном давлении 0.9 МПа, приведенные на рис. 6, дополняют данные [24]. Эти значения в численной модели определялись на основе расчетного критического массового расхода путем вычисления средней плотности парожидкостной смеси в выходном сечении трубы и последующего деления значения массового расхода ($\rho w_{кр}$) на среднюю плотность в выходном сечении. При этом давление парожидкостной смеси в выходном сечении рабочего участка находилось в диапазоне 0.22–0.27 МПа.

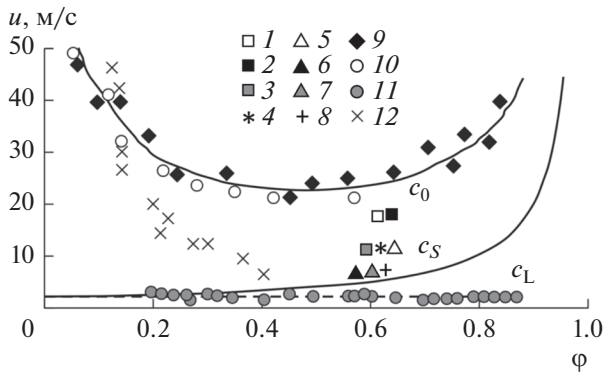


Рис. 6. Скорость акустических возмущений, расчет: канал без засыпки $X_{\text{нач}} = 0.05$ (1) и 0.2 (2); засыпка диаметром 4 (3–5) и 2 мм (6–8) при $X_{\text{нач}} = 0.05$ и недогреве 155 градусов (3, 6), при отсутствии недогрева (4, 7) и тепловом потоке $q = 200 \text{ кВт/м}^2$ (5, 8); c_0 — адиабатная скорость звука в воздушно-водяной смеси при $P = 0.1$ МПа, c_S — термодинамически равновесная скорость звука для парожидкостной смеси при 0.2 МПа, c_L — скорость звука Ландау при 0.1 МПа; данные [24]: воздушно-водяная смесь при 0.1 МПа с засыпкой 8 мм (9) и без засыпки (10); скорость при характерной частоте возмущений 1.5–2.5 Гц (11) и 9–16 Гц (12) для парожидкостной смеси при 0.2 МПа.

Здесь проведено сопоставление расчетных данных с ранее полученными экспериментальными результатами. Видно, что расчетные данные (точки 3–8) лежат в области значений между термодинамически равновесной скоростью звука и замороженной (c_0) [15], при этом точки 1, 2 получены для случая без зернистой засыпки. Об этом же свидетельствуют и экспериментальные результаты, основанные на дисперсионном характере скорости звука. Гипотеза о гомогенизации парожидкостной среды, предложенная в [24], по-видимому, справедлива. Так, в зернистой засыпке расчетные значения скорости звука находятся ближе к равновесной скорости звука (точки 3–8), чем скорости звука в канале без засыпки (точки 1, 2). Это может быть связано с гомогенизацией структуры парожидкостного потока при течении через зернистую засыпку вследствие интенсификации межфазного (жидкость–пар) тепло- и массообмена. Эффект гомогенизации парожидкостной среды в численной модели был продемонстрирован при анализе распределения пара по сечению канала (рис. 3–5).

Как было показано в [24], скорость звука зависит от характерных частот входного возмущения, варьирующихся в диапазоне $2 < f < 9$ Гц [15], что подтверждает дисперсионный характер скорости звука в парожидкостной среде (экспериментальные точки 9–12). Расслоение данных связано с влиянием диаметра частиц, а также, возможно, с дисперсионными эффектами, которые в дальнейшем будут учтены в расчетной модели в явном виде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые результаты численного моделирования, опирающиеся на экспериментальные исследования по критическому истечению парожидкостного потока в канале с шаровой засыпкой. Показано влияние длины слоя, диаметра шаровой засыпки, ее теплофизических свойств и начальных параметров потока на критический массовый расход и соответствующую локальную скорость звука. Приведена оценка коэффициента скольжения фаз в зависимости от начальной массовой доли пара в смеси. Зависимость демонстрирует резкий рост в области массовой доли пара до 0.05 с последующим монотонным убыванием, которое может быть связано с переходом к эмульсионному режиму течения. Применение расчетной модели в трехмерной постановке позволило впервые получить распределение паросодержания в канале. Получено распределение пара по сечению канала в трех характерных точках рабочего участка, для случаев недогрева зернистой засыпки, температуре насыщения и перегрева частиц засыпки. Показано, что зернистая засыпка в канале ведет к гомогенизации парожидкостного потока. Переход от недогрева к перегреву зернистой засыпки приводит к усилению парообразования и гомогенизации среды. В распределении пара по сечению наблюдается минимум паровой фазы у стенки трубы с последующим скачкообразным ростом, что может говорить о наличии пленки жидкости на поверхности трубы. На основе результатов численного моделирования проведена оценка скорости звука на выходе из канала с шаровой засыпкой, значения которой лежат в области между термодинамически равновесной и замороженной скоростями звука, что согласуется с имеющимися экспериментальными данными. Расслоение экспериментальных данных связано с влиянием диаметра частиц, а также, возможно, с дисперсионными эффектами, которые в дальнейшем будут учтены в расчетной модели наряду с гидравлическими потерями в явном виде.

Статья подготовлена в рамках выполнения базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (проект АААА-А20-120092190052-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараксин А.Ю. Гидрогазодинамика и теплофизика двухфазных потоков: проблемы и достижения (Обзор) // ТВТ. 2013. Т. 51. № 3. С. 421.
2. Назанский С.Л., Солохин А.В. Влияние температурного режима реактора на величину рециркулирующего потока // Тонкие хим. технологии. 2019. Т. 14. № 5. С. 31.
3. Нигматулин Б.И., Сопленков К.И. Исследование нестационарного истечения вскипающей жидко-

- сти из каналов в термодинамически неравновесном приближении // ТВТ. 1980. Т. 18. № 1. С. 118.
4. *Travis J.R., Piccioni Koch D., Breitung W.* A Homogeneous Non-equilibrium Two-phase Critical Flow Model // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2012. V. 37. № 22. P. 17373.
 5. *Boccardi G., Bubbico R., Celata G.P., Mazzarotta B.* Two-phase Flow Through Pressure Safety Valves. Experimental Investigation and Model Prediction // *Chem. Eng. Sci.* 2005. V. 60. № 19. P. 5284.
 6. *Wilkening H., Baraldi D.* CFD Modelling of Accidental Hydrogen Release from Pipelines // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2007. V. 32. № 13. P. 2206.
 7. *Сорокин В.В.* Расчет теплоотдачи засыпки шаровых тепловыделяющих элементов к двухфазной жидкости // ТВТ. 2008. Т. 46. № 4. С. 575.
 8. *Chandra V., Peters E., Kuipers J.* Direct Numerical Simulation of a Non-isothermal Non-adiabatic Packed Bed Reactor // *Chem. Eng. J.* 2020. V. 385. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123641>
 9. *Авдеев А.А.* Устойчивость скачков вскипания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 769.
 10. *Smorchkova Y.V., Varava A.N., Dedov A.V., Komov A.T.* Experimental Study of Fluid Dynamics in the Pebble Bed in a Radial Coolant Flow // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 754. № 11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/754/11/112008>
 11. *Тауров Э.А., Покусаев Б.Г., Быкова С.М.* Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 277.
 12. *Тауров Э.А., Таурова Е.В., Хан П.В.* Газодинамическая модель критического и докритического истечения пароводяной смеси через слой шаровых частиц // *Вестн. ИРГТУ*. 2018. Т. 22. № 9. С. 162.
 13. *Нигматуллин Р.И.* Динамика многофазных сред. Ч. 2. М.: Наука, 1987. 360 с.
 14. *Tairov E.A., Khan P.V.* Hydraulic and Gas-dynamic Models of a Steam-water Mixture Flow in a Granular Bed // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. 1382. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1382/1/012101>
 15. *Покусаев Б.Г., Тауров Э.А., Гриценко М.Ю.* Распространение возмущений давления в пористой среде при фильтрации двухфазного потока // ТВТ. 2004. Т. 42. № 6. С. 947.
 16. *Губайдуллин А.А., Ивандеев А.И., Нигматуллин Р.И.* Исследование нестационарного истечения вскипающей жидкости в термодинамически равновесном приближении // ТВТ. 1978. Т. 6. № 3. С. 556.
 17. *Bartosiewicz Y., Seynhaeve J.-M., Serre G.* Delayed Equilibrium Model and Validation Experiments for Two-Phase Choked Flows Relevant to LOCA // *NURETH-14 The 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermalhydraulics*. Toronto. Canada. 2011. P. 1.
 18. *Авдеев А.А., Пехтерев В.П., Сиренко Е.И.* Расчет критического расхода вскипающей жидкости в рамках модели гомогенного равновесного потока // *Атомная энергия*. 1987. Т. 63. № 1. С. 61.
 19. *De Lorenzo M., Lafon Ph., Seynhaeve J.-M., Bartosiewicz Y.* Benchmark of Delayed Equilibrium Model (DEM) and Classic Two-phase Critical Flow Models Against Experimental Data // *Int. J. Multiphase Flow*. 2017. V. 92. P. 112.
 20. *Bartosiewicz Y., Seynhaeve J.-M.* Delayed Equilibrium Model (DEM) of Flashing Choked Flows Relevant to LOCA and Implementation in System Codes // *ICONE22: 22nd Int. Conf. on Nuclear Engineering*. Prague. Czech Republic. 2014. P. 1.
 21. *Monaghan J.J.* Smoothed Particle Hydrodynamics // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 68. P. 1703.
 22. *Pütz M., Nielaba P.* Effects of Temperature on Spinodal Decomposition and Domain Growth of Liquid-vapor Systems with Smoothed Particle Hydrodynamics // *Phys. Rev. E*. 2015. V. 91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.91.032303>
 23. *Филиппов Г.А., Гришанин Е.И., Кондитеров М.В., Мастюкин В.П., Трубачев В.М., Фальковский Л.Н., Фонарев Б.И., Момот Г.В.* Экспериментальное исследование работоспособности защитных оболочек микротрещин применительно к условиям тяжелых аварий легководных реакторов // *Атомная энергия*. 2007. Т. 103. № 5. С. 302.
 24. *Покусаев Б.Г., Тауров Э.А., Васильев С.А.* Скорость низкочастотных волн давления в парожидкостной среде с неподвижным слоем шаровых частиц // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 3. С. 341.