

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ИСТЕЧЕНИЕ ПАРОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ КАНАЛ
С МОНОДИСПЕРСНЫМ ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ¹

© 2022 г. Д. П. Храмцов^{a, b, *}, Б. Г. Покусаев^a, Д. А. Некрасов^a, А. В. Вязьмин^b

^aМосковский политехнический университет, Большая Семеновская ул., д. 38, Москва, 107023 Россия

^bМИРЭА – Российский технологический университет, просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454 Россия

*e-mail: dp@khramtsov.net

Поступила в редакцию 16.03.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Выполнено трехмерное численное моделирование нестационарного истечения двухфазного потока жидкость–пар из трубки со сферической монодисперсной засыпкой. Численная модель разработана методом сглаженных частиц, проведена ее верификация по экспериментальным данным о движении пузырькового потока в трубке. Определены минимальный размер модельных сглаженных частиц и их количество, необходимое для построения корректной расчетной модели. Получены структурные и гидравлические характеристики потока при наличии фазовых переходов. Приведены расчетные данные по трехмерному пространственному распределению паровой фазы и потерям давления как по сечению элементарной ячейки, формируемой дисперсной засыпкой, так и по всей длине канала. Выполнен анализ динамики изменения потерь давления по длине трубки, обнаружены два характерных участка с разной динамикой роста потерь давления. Получены данные по распределению объемного паросодержания в трубке при ее различных положениях: горизонтальном, вертикальном и с наклоном 45°. Показано влияние угла наклона трубки на характер распределения пара по ее сечению. При этом наибольшее отличие в структуре наблюдается между вертикальным и горизонтальным положениями. Также продемонстрировано, что при движении потока его структура стремится к гомогенной. Использованная расчетная модель позволила определить потери давления в рабочем участке от входа парожидкостного потока в трубку до выходного отверстия при условиях, соответствующих началу критического режима истечения. Проведено сопоставление результатов численных расчетов, в том числе критических массовых расходов при истечении парожидкостного потока из трубки, с имеющимися экспериментальными данными и полученными ранее результатами аналитических исследований, отмечено их хорошее соответствие.

Ключевые слова: критические потоки, зернистый слой, вычислительная гидродинамика, двухфазные потоки, фазовые переходы, монодисперсная засыпка, объемное паросодержание

DOI: 10.1134/S0040363622020011

В настоящее время прослеживается тенденция к использованию в промышленной энергетике мобильных энергетических установок малой мощности, включая маломощные ядерные реакторы, в том числе на основе микротвэлов [1], а также био- и каталитические реакторы. Для развития мобильных реакторов малой мощности требуется обеспечение их безопасного функционирования.

Одним из главных параметров, характеризующих течение двухфазных потоков в зернистых средах, является гидравлическое сопротивление. Для его определения существуют расчетные методики [2], разработанные с помощью модели го-

могенных потоков [3] и позволяющие провести оценку гидравлического сопротивления в зависимости от объемного паросодержания и порозности засыпки.

Понимание физических закономерностей, лежащих в основе подобных процессов, крайне важно для анализа аварийных ситуаций, которые могут произойти при нарушении герметичности реакторов и теплообменных аппаратов. При аварийной разгерметизации емкости, содержащей жидкость под высоким давлением, возникает явление критического истечения парожидкостной смеси с возможным достижением режима газодинамического запираания. Исследования подобных процессов связаны с необходимостью решить множество проблем. Прежде всего, следует учитывать многофазность среды, нестационар-

¹ Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания ФГАОУ ВО “Московский политехнический университет” (номер государственной регистрации АААА-А20-120092190052-9).

ность протекающих процессов, фазовые переходы, влияние свойств зернистой засыпки на процесс [4], а также теплообмен между стенками трубки, жидкой и паровой фазами и дисперсной засыпкой [5]. Наличие зернистой засыпки приводит к существенному усложнению формы каналов при движении теплоносителя, что влечет за собой интенсификацию теплообмена [6].

В отличие от пустых трубок, в трубках со сферической засыпкой образуются микроканалы, которые в биореакторах, состоящих из гелевых микроструктур, искусственно формируются методом трехмерной биопечати. Подобная засыпка может рассматриваться как модельная среда при построении и верификации новых численных методов, разрабатываемых для расчета процессов переноса жидкости и газа в структурированных средах, например, на основе гелей при моделировании внутриобъемного культивирования клеток в специальных биореакторах.

Критерии оценки перехода потока в критическую стадию могут быть получены при анализе сопутствующих акустических процессов. Экспериментальные исследования [7, 8] по определению акустических характеристик критического парожидкостного потока показали, что акустические возмущения в подобном потоке обладают широким спектром, их минимальные значения составляют несколько герц. Установлено, что в критическом потоке реализуется как “замороженная” скорость звука (без учета фазовых переходов) [8], так и низкочастотная, термодинамически равновесная.

Для исследования влияния акустических эффектов на процесс критического истечения нужны данные о локальных характеристиках потока. Ввиду ограниченности результатов, которые возможно получить при экспериментальном исследовании такой сложной задачи, требуется проводить численный анализ. При этом особый интерес представляет моделирование процесса в трехмерной постановке. Наличие зернистой засыпки приводит к гомогенизации двухфазного потока и созданию условий, необходимых, в частности, для реализации равновесной скорости звука [8].

В настоящее время количество опытных данных о возникновении и развитии критических потоков в зернистом слое мало. Так, в работе [9] описываются эксперименты по определению массового расхода парожидкостной смеси при критическом истечении из канала с зернистой засыпкой. Процесс рассматривается как изоэнтальпийный и адиабатический. В результате эксперимента получены зависимости массового расхода парожидкостной смеси от падения давления в канале. На их основе для описания критического потока парожидкостной смеси предложена политропическая модель, выведенная из соотношений, приведенных в [10]. Анализ, проведенный в [9], показал, что

геометрические характеристики зернистой засыпки и длина рабочего участка оказывают существенное влияние на критический массовый расход.

Практический интерес представляет оценка влияния положения рабочего участка (вертикального, горизонтального или наклонного) с зернистой средой в пространстве на характеристики и структуру потока. Так, в системах жидкость – газ при свободном всплытии газовых пузырьков в трубках, заполненных жидкостью и зернистой засыпкой, установлена взаимосвязь между углом наклона трубки и скоростью движения газовой фазы. Указанная зависимость имеет нелинейный экстремальный характер с максимумом скорости, приходящимся на угол наклона 60° [11].

В связи со сложностью процессов, протекающих в реакторных установках, для исследования последствий потенциальных аварий необходимо применять методы компьютерного моделирования. Существующие расчетные коды, такие как ЕВКЛИД [12] и КОРСАР [13], предназначены для моделирования аварийных ситуаций на водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) и реакторах на быстрых нейтронах, например БРЕСТ. Однако все большее значение приобретает создание методов моделирования потенциальных аварийных ситуаций в реакторах на основе микротвэлов, в частности двухфазных критических потоков, которые могут сформироваться при разгерметизации реактора [14].

Для задач моделирования критического истечения при возникновении аварийной ситуации скорость вычислений играет решающую роль. Возможность моделирования аварийного истечения двухфазного потока в реальном времени и разработка соответствующего программного обеспечения позволят оперативно оценить последствия аварии и принять необходимые меры по ее ликвидации. Для проведения сложных многопараметрических расчетов в реальном времени требуется обеспечить высокую скорость вычислений, для чего используется параллелизация вычислительных процессов. Для адаптации расчетных моделей к параллельным вычислениям необходимо выбрать численный метод, позволяющий проводить эффективную параллелизацию расчетных алгоритмов. Метод сглаженных частиц имеет высокий потенциал к применению при проведении вышеописанных вычислений по сравнению с классическими методами, такими как метод конечных элементов и метод конечных объемов [15].

Распространенным подходом при численном моделировании критических двухфазных потоков является использование гомогенной равновесной модели, в которой предполагается, что жидкая и газовая фазы находятся в состоянии равновесия [14], при котором их скорости счита-

ются одинаковыми. Данная модель не учитывает возможность скольжения фаз, что приводит к существенным погрешностям в ходе оценки потерь давления при возникновении критического потока, тогда как равновесная модель с запаздыванием позволяет наиболее точно описать критический поток и может быть использована для оценки потерь теплоносителя при аварийной разгерметизации охлаждающего контура ядерного реактора.

Цель настоящей работы – определение теплофизических и гидравлических характеристик нестационарного парожидкостного потока в трубке, заполненной зернистой засыпкой. К таким характеристикам относятся истинное паросодержание, потери давления между входом и выходом рабочего участка, а также форма и длина зернистого слоя, влияющие на критический расход парожидкостного потока, в том числе в условиях аварийной разгерметизации энергетического аппарата. Расчетная модель позволяет получать новые данные по характеристикам парожидкостного потока в диапазонах параметров, не определяемых в экспериментах [9]. Также она учитывает влияние угла наклона трубки на структуру и гидравлические характеристики двухфазного потока. Анализ расчетных данных не только для трубки в целом, но и для элементарной ячейки зернистого слоя позволит установить новые закономерности течения парожидкостного потока в канале с твердой фазой с учетом возможных фазовых переходов.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Метод сглаженных частиц относится к классу лагранжевых бессеточных методов и впервые был использован для решения астрофизических задач. Впоследствии он был адаптирован для широкого спектра технических и теоретических расчетов, включая задачи, связанные с моделированием двухфазных потоков [16]. Расчет на основе метода сглаженных частиц приведен в [17].

Данный метод основан на представлении жидкости как набора дискретных частиц, взаимодействующих между собой. При этом каждая из них является не конкретной частицей жидкости или газа, представленной на молекулярном уровне, а лишь математическим объектом, аппроксимирующим физические величины в своей окрестности. Такая аппроксимация достигается путем введения сглаживающей функции W , в качестве которой часто применяются B -сплайны и функция Гаусса [17]. В общем виде любая физическая величина A в заданной точке r при использовании метода сглаженных частиц рассчитывается следующим образом:

$$A(r) = \int A(r') W(r - r', h) dr', \quad (1)$$

где $A(r')$ – значение произвольной величины A в соседней точке r' ; h – расстояние сглаживания [17].

Так, например, кинематический коэффициент вязкости и давление p для каждой сглаженной частицы i вычисляются по формулам:

$$p_i = -\sum_j m_j \frac{p_j - p_i}{p_j} W(|r_i - r_j|, h); \quad (2)$$

$$v_i = \mu \sum_j m_j \frac{v_j - v_i}{v_j} \nabla W(|r_i - r_j|, h), \quad (3)$$

где m_j – масса j -й частицы; $r_i - r_j$ – расстояние между соседними частицами i и j .

При сравнении метода сглаженных частиц с традиционными сеточными численными методами, такими как метод конечных разностей и метод конечных элементов, выявлено, что традиционные методы при некоторых приложениях [18] демонстрируют лучшие результаты и очень хорошо зарекомендовали себя в области вычислительной гидродинамики. Метод сглаженных частиц используется при решении задач, где традиционные сеточные методы применять затруднительно, например при наличии свободной поверхности для движущихся тел с деформируемыми границами, в задачах гидродинамики для геометрически сложных областей, таких как движение жидкости или газа в пористых или зернистых средах. Метод сглаженных частиц обеспечивает также высокий уровень устойчивости расчетной модели в задачах, имеющих широкий спектр параметров, например, включающих расчет гидродинамики и процессы теплообмена при наличии фазовых превращений [18].

Математически метод сглаженных частиц представляет собой интерполяцию, когда любая функция может быть интерполирована с помощью сглаживающего ядра – специальной функции интерполятора. В модели, разработанной авторами [17], в качестве сглаживающего ядра при решении задач гидродинамики и тепломассообмена используется функция Гаусса.

Для верификации метода при изучении газожидкостных потоков выполнена его проверка на задачах по течению двухфазного пузырькового потока в вертикальной трубке [19]. Рассматривался случай нисходящего течения с медианным диаметром пузырьков $d_{п} = 0.8$ мм, осредненной по сечению трубки скоростью жидкой фазы $v_L = 0.5$ м/с (L – длина рабочего участка) и объемной долей газа $\phi = 0.156$. Задача решалась в трехмерной постановке. Генерация пузырьков выполнялась равномерно по всему сечению трубки. По результатам моделирования была построена кривая распределения истинного газосодержания по сечению трубки диаметром 50 мм (рис. 1).

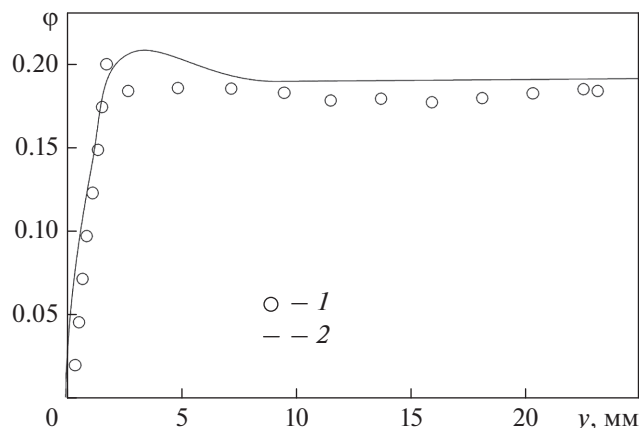
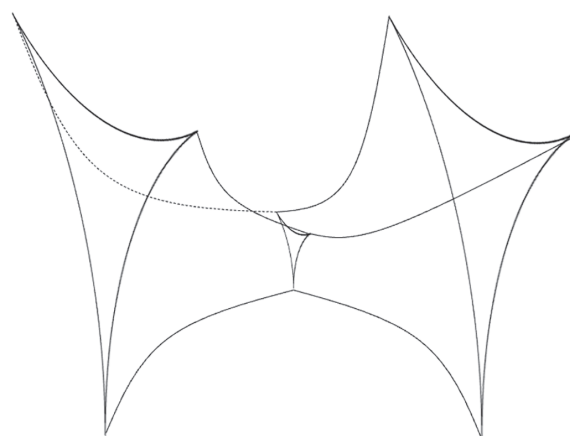


Рис. 1. Распределение истинного газосодержания по сечению трубки y :
 $y = 0$ мм – стенка; $y = 25$ мм – середина трубки;
 1 – эксперимент [19]; 2 – расчет

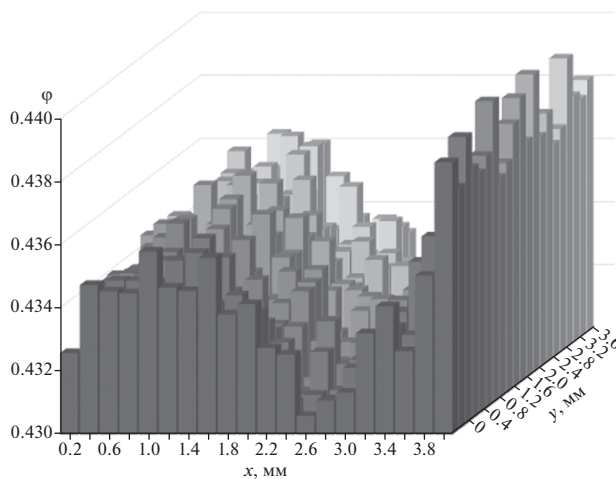
Из рисунка видно, что, согласно как экспериментальным, так и расчетным данным, непосредственно у стенки трубки имеется слой жидкости, свободный от пузырьков. Далее происходит резкий рост газосодержания до достижения максимума, затем по сечению трубки устанавливается равномерное распределение газовой фазы.

СТРУКТУРА ПАРОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЕ

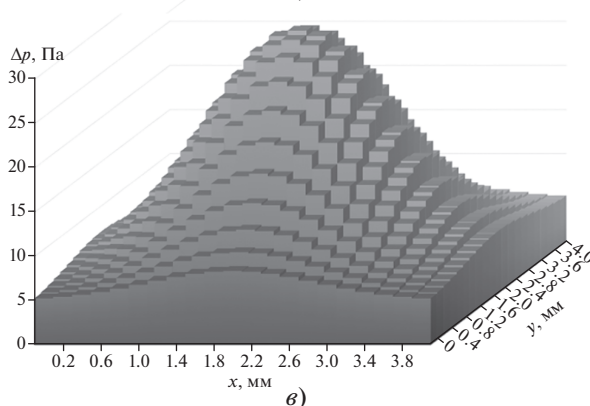
Следует отметить, что в методе сглаженных частиц, в отличие от молекулярной динамики, частица является не физическим объектом, а лишь математическим представлением фрагмента расчетной области [17]. Возникает трудность в определении соотношения размера сглаженной частицы и реального размера расчетной области. Другая сложность связана с определением минимального количества сглаженных частиц, необходимого для получения корректных результатов моделирования. Это особенно важно при расчетах негомогенных структур, таких как двухфазные потоки в каналах с зернистым слоем. Применение метода сглаженных частиц в задачах гидрогазодинамики показывает, что для получения корректных результатов расчетов одномерной задачи следует использовать не менее 20 сглаженных частиц [16]. При трехмерных расчетах элементарный объем ячейки зернистой засыпки рассматривается как куб со стороной 4 мм. Он разбивается на 400 секций, представляющих собой параллелепипеды со стороной основания 0.2 мм, в которых размещаются 20 сглаженных частиц по каждому направлению. Таким образом, размер одной сглаженной частицы составляет примерно 2×10^{-5} м.



a)



b)



c)

Рис. 2. Локальная структура парожидкостного потока в ячейке зернистого слоя:

a – геометрия свободного пространства между сферической засыпкой; б – распределение истинного паросодержания; в – распределение потерь давления

Для исследования локальной структуры двухфазного потока, а также потери давления между началом рабочего участка и выходным отверстием рассмотрена свободная область в ячейке зернистого слоя, состоящего из трех сфер (рис. 2, a). Для данной области на основе расчетных данных

построено трехмерное локальное распределение величин истинного паросодержания в выделенном объеме (рис. 2, б), а также локальное распределение потерь давления (профилей давления) (рис. 2, в).

Зернистый слой представляет собой совокупность сферических частиц, образующих сложную разветвленную сеть мини-каналов переменного сечения. При этом, например, сужение каналов приводит к локальному увеличению потерь давления. Это с учетом двухфазности потока ведет к конденсации части пара в данной области и замедлению роста объемного паросодержания по длине трубки. Однако в каждой последующей ячейке зернистого слоя объемная доля пара оказывается больше, чем в предыдущей, что указывает на общую тенденцию повышения объемного паросодержания в канале, несмотря на его локальные снижения в областях сужения.

Наличие зернистой засыпки приводит к увеличению влияния гидравлического сопротивления на такую важную характеристику потока, как объемное паросодержание. Полученное распределение потерь давления в ячейке зернистого слоя указывает на то, что они максимальны в наиболее узком участке, формируемом зернистой засыпкой, с последующим уменьшением объемного паросодержания при расширении сечения канала в ячейке. Сопоставление изменения потерь давления и объемного паросодержания в соответствующих частях ячейки зернистой засыпки свидетельствует о их разнонаправленной динамике. Так, в области сужения, где потери давления увеличиваются, наблюдается локальное уменьшение истинного объемного паросодержания.

Теплофизические свойства материала оказывают существенное влияние на процесс парообразования. Далее рассматриваются четыре материала засыпки: сталь, свинец, боросиликатное стекло и эбонит. Выбор материалов обусловлен стремлением исследовать широкий диапазон изменения коэффициента теплопроводности. Расчеты показали, что этот теплофизический параметр влияет на уровень объемного паросодержания в элементарной ячейке при сохранении тенденции его изменения по ее длине в направлении движения потока. Так, максимальные значения истинного паросодержания в ячейке наблюдаются для стекла и эбонита, а минимальные — для свинца и стали. Однако профили объемного паросодержания в ячейке (см. рис. 2, б) определяются в большей степени изменением формы стенок элементарной ячейки (сужение, расширение). При этом по всей длине рабочего участка ($L = 300$ мм) большой вклад в конечное значение объемного паросодержания вносит материал зернистой засыпки.

Стоит отметить, что подобный анализ, учитывающий микроструктуру материала, может быть использован при расчете двухфазных потоков в гелевых средах применительно к задачам биопринтинга (технологии создания объемных моделей на клеточной основе), включая моделирование биореакторов для культивирования клеток. В этом случае зернистый слой может быть использован как модельная среда для учета микроструктуры геля, а свободное пространство — как сеть каналов для питания клеток и отвода продуктов их метаболизма, в том числе и выделяемых газов.

Далее была изучена структура парожидкостного потока в зависимости от угла его наклона. Получены профили объемного паросодержания по сечению трубки при трех расстояниях от начала рабочего участка: 10, 100 и 350 мм. Расчеты показали, что при критическом режиме течения (давление на входе $p_1 = 0.9$ МПа), когда его скорость равна локальной скорости звука [5], угол наклона не оказывает существенного влияния на структуру потока, поскольку вклад динамической потери давления является определяющим по сравнению с влиянием силы тяжести.

При снижении начального давления на входе в рабочий участок до 0.25 МПа наклон трубки к горизонтали оказывает влияние на структуру распределения пара по сечению канала. На рис. 3 представлено распределение локального объемного паросодержания по сечению канала при трех расстояниях от начала рабочего участка для вертикального и горизонтального положения трубки, а также при ее наклоне на угол 45° .

При вертикальном положении трубки (см. рис. 3, а) распределение объемного паросодержания практически равномерно, за исключением области около стенки, где наблюдается минимум паровой фазы, что обусловлено наличием слоя жидкости на стенке трубки. При наклоне трубки на 45° происходит рост количества паровой фазы у стенок. В горизонтальном положении трубки распределение паровой фазы становится инвертированным (см. рис. 3, б, в) относительно вертикального положения и структура потока существенно меняется. Подобное изменение связано с тем, что при горизонтальном положении жидкая фаза постепенно стекает в нижнюю часть трубки.

Полученные зависимости изменения среднего истинного паросодержания по длине рабочего участка для различных начальных значений объемного паросодержания приведены на рис. 4, а, б. Объемное паросодержание быстро возрастает в начале рабочего участка, затем стабилизируется, и его зависимость становится практически линейной на расстоянии примерно 50 мм от начала рабочего участка.

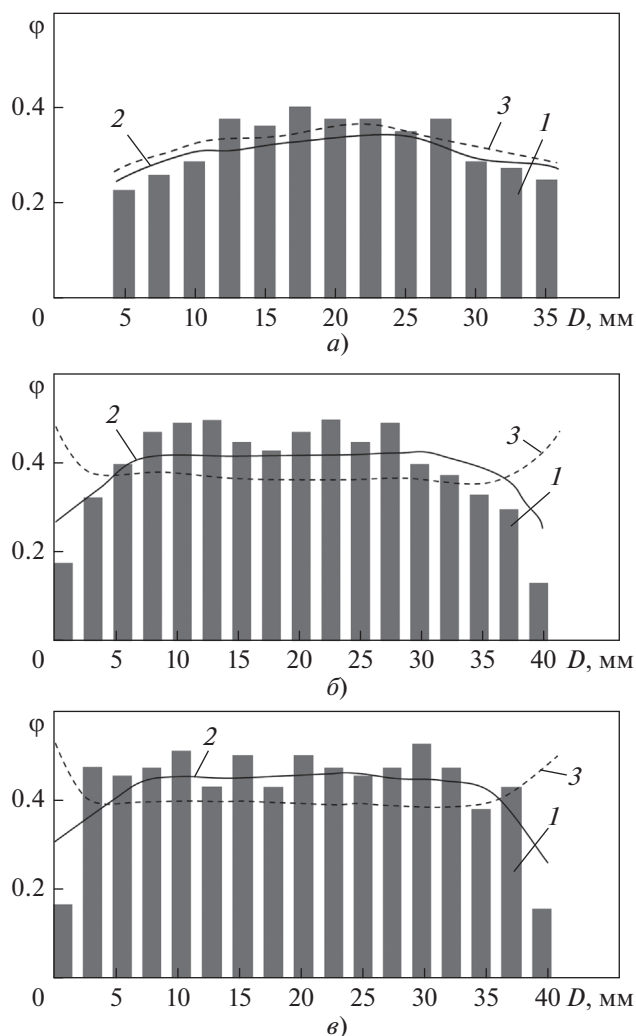


Рис. 3. Профили истинного паросодержания в рабочем участке.
Расстояние от начала рабочего участка: а – 10 мм; б – 100 мм; в – 350 мм. Положение трубки: 1 – вертикальное; 2 – наклон под углом 45°; 3 – горизонтальное

Данные о потерях давления Δp по длине канала L , рассчитанные от входа в рабочий участок до его выхода, сопоставлены с имеющимися результатами, полученными с помощью аналитических моделей. Для расчета потерь давления в начале и конце рабочего участка использованы данные [20] по изменению давления в канале с шагом 10 мм по длине рабочего участка (рис. 5).

На этом рисунке результаты расчетов по аналитической модели представлены для двух значений давления: на входе в рабочий участок и выходе из него, что соответствует данным эксперимента [20]. Наблюдаемое увеличение потерь давления по длине трубки имеет два участка с различным темпом изменения: примерно до 60 мм от начала рабочего участка Δp практически постоянны и составляют около 10 кПа, затем на рассто-

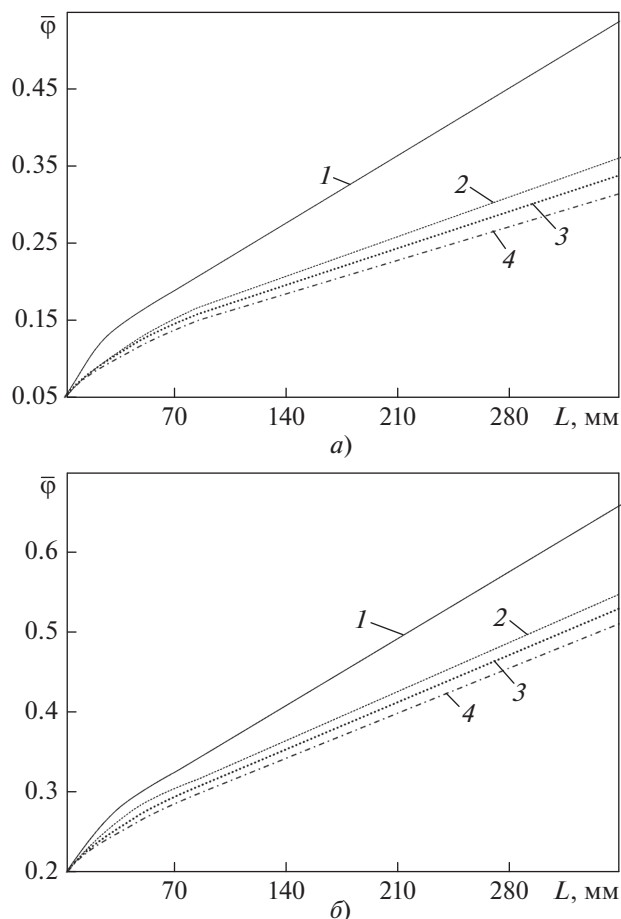


Рис. 4. Среднее истинное паросодержание $\bar{\varphi}$ по длине рабочего участка ($L = 355$ мм) при начальном массовом паросодержании $x_0 = 0.05$ (а) и $x_0 = 0.2$ (б). Положение трубки: 1 – вертикальное (критическое течение), $p_1 = 0.9$ МПа; 2 – вертикальное, $p_1 = 0.25$ МПа; 3 – наклон под углом 45°, $p_1 = 0.25$ МПа; 4 – горизонтальное, $p_1 = 0.25$ МПа

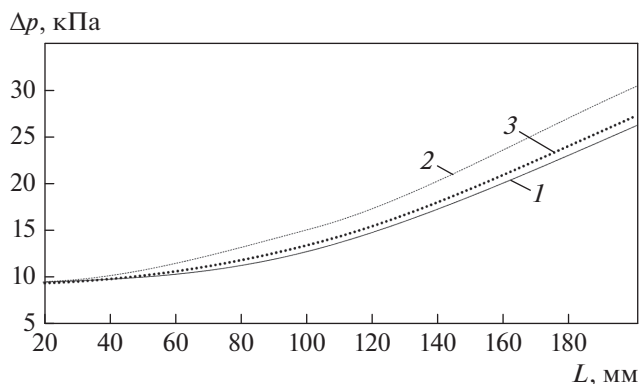


Рис. 5. Потери давления по длине трубки при давлении на входе $p_1 = 0.6$ МПа, диаметре зерен сферической засыпки $d = 2$ мм, начальном массовом паросодержании $x_0 = 0.011$ и высоте слоя засыпки $H = 200$ мм [20]. Модель: 1 – газодинамическая [20]; 2 – гидравлическая [2]; 3 – на основе метода сглаженных частиц

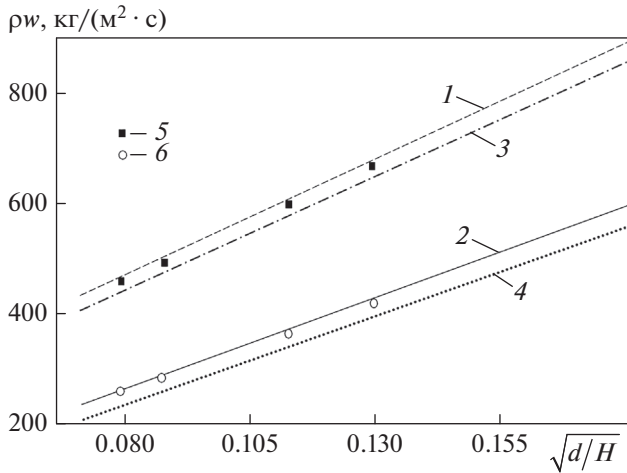


Рис. 6. Зависимость критического массового расхода ρ_w от безразмерного критерия $\sqrt{d/H}$ при различном положении трубки.
 Расчет, положение трубки: вертикальное, 1 – $x_0 = 0.022$; 2 – $x_0 = 0.178$; горизонтальное, 3 – $x_0 = 0.022$; 4 – $x_0 = 0.178$.
 Эксперимент, положение трубки вертикальное: 5 – $x_0 = 0.022$; 6 – $x_0 = 0.178$

янии примерно 80 мм Δp начинают резко расти, что связано, по-видимому, с изменением объемного паросодержания и, соответственно, структуры потока. Действительно, как видно из рис. 3, б, приблизительно на этом расстоянии от начала рабочего участка наблюдается профиль объемного паросодержания, соответствующий гомогенному парожидкостному потоку.

КРИТИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ИСТЕЧЕНИЯ

Для оценки влияния геометрических параметров зернистой засыпки (диаметра зерна засыпки и длины слоя засыпки) на критический расход (расход, при котором дальнейшее увеличение напора не приводит к увеличению массового расхода в связи с тем, что поток на выходе из трубки достигает локальной скорости звука) для парожидкостной смеси в работе [9] был введен безразмерный параметр $\sqrt{d/H}$, связывающий диаметр зерна d и высоту слоя засыпки H . Этот параметр, по существу, является геометрическим масштабирующим параметром истечения парожидкостного потока. Данные расчетов для сферической засыпки с зернами диаметром 2, 4 и 8 мм для дисперсных слоев высотой (или длиной в случае горизонтального положения трубки) 250 и 355 мм представлены на рис. 6. Для сравнения здесь же приведены экспериментальные данные [9]. Из рисунка видно, что при переводе рабочего участка из вертикального положения в горизонтальное существенного изменения в значениях критического расхода не наблюдается и расхождение не превышает 2%. Таким образом, установлено, что при критическом режиме истечения критический расход зависит в основном от параметров зернистого слоя (диаметра зерна засыпки, длины зернистого слоя).

Далее проводится анализ области критических расходов с помощью предложенной численной модели и их сравнение с результатами расчетов по газодинамической [2] и гидравлической моделям [9]. Под областью критических расходов понимается совокупность параметров (давление, начальное объемное паросодержание, геометрические характеристики зернистого слоя), приво-

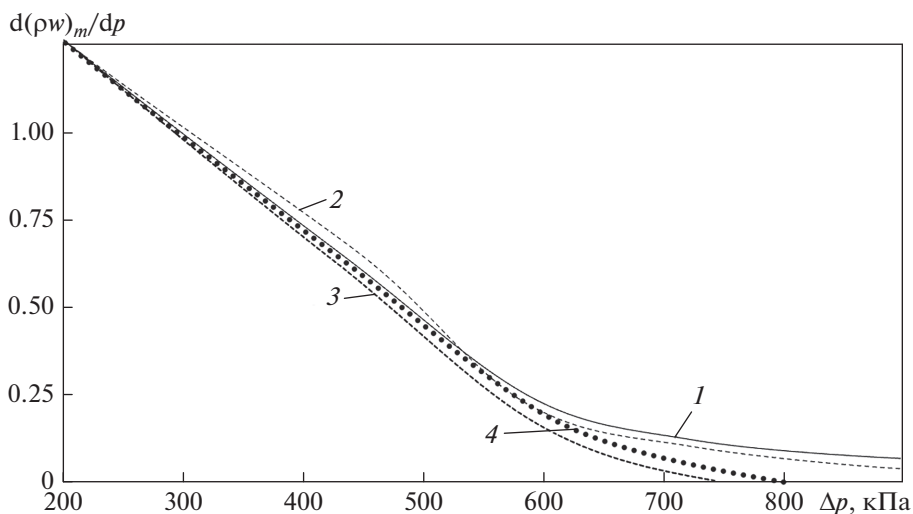


Рис. 7. Зависимость увеличения массового расхода от потери давления:
 1 – газодинамическая модель [20]; 2 – гидравлическая модель; 3 – расчет методом сглаженных частиц; 4 – эксперимент [9]

дящих к возникновению критического режима течения. При этом критический расход соответствует расходу парожидкостной смеси в критическом режиме течения. Для этого строится зависимость приращения массового расхода $d(\rho w)/dp$, где ρw – массовый расход парожидкостного потока, от потери давления Δp (рис. 7). На этом рисунке приведены экспериментальные данные работы [9], а также результаты расчетов.

Анализ этого рисунка показывает, что расчет на основе метода сглаженных частиц дает точку критического истечения, соответствующую критическому массовому расходу при потерях давления, равных примерно 730 кПа, что хорошо согласуется с данными эксперимента [9].

ВЫВОДЫ

1. Численное трехмерное моделирование нестационарного истечения двухфазного парожидкостного потока из трубки со сферической монодисперсной засыпкой показало, что сужение канала в элементарной ячейке зернистого слоя приводит к локальному уменьшению объемного паросодержания из-за частичной конденсации пара, возникающей вследствие увеличения локальных потерь давления, т.е. структура потока определяется профилем давления в элементарной ячейке. Теплофизические свойства материала засыпки существенно влияют на значения истинного паросодержания при длинах рабочего участка в диапазоне от 200 до 300 мм.

2. При начальных давлениях ниже 0.25 МПа угол наклона рабочего участка оказывает существенное влияние на структуру потока. При угле наклона менее 45° наблюдается увеличение концентрации жидкой фазы в нижней части трубки с преобладанием паровой фазы в ее верхней части.

3. Использование метода сглаженных частиц позволило определить потери давления, при которых реализуется критический режим истечения и, соответственно, критический массовый расход. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по потерям давления, соответствующим критическому режиму течения, достигнуто их хорошее соответствие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Опыт** создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов / В.И. Макаров, Б.Г. Пологих, Н.С. Хлопкин, Ф.М. Митенков, Ю.К. Панов, В.И. Полуничев, О.А. Яковлев // Атомная энергия. 2000. Т. 89. Вып. 3. С. 179–189.
2. **Авдеев А.А., Созиев Р.И.** Гидродинамическое сопротивление потока пароводяной смеси в шаровой засыпке // ТВТ. 2008. Т. 46. № 2. С. 251–256.
3. **Maher D., Hana A., Habib S.** New correlations for two phase flow pressure drop in homogeneous flows model // Therm. Eng. 2020. V. 67. Is. 2. P. 92–105. <https://doi.org/10.1134/S0040601520020032>
4. **Карташов Э.М.** Модельные представления теплового удара в динамической термоупругости // Рос. технол. журн. 2020. Т. 8. № 2 (34). С. 85–108. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108>
5. **Pokusaev B.G., Tairov E.A.** Shock processes under conditions of power surge in an annular channel // High Temperature. 1997. V. 35. Is. 1. P. 90–95.
6. **Зейгарник Ю.А., Поляев А.М.** Теплообмен в пористых структурах: современное состояние и основные направления исследования // Теплоэнергетика. 1996. № 1. С. 62–70.
7. **Покусаев Б.Г., Таиров Э.А., Васильев С.А.** Скорость низкочастотных волн давления в парожидкостной среде с неподвижным слоем шаровых частиц // Акустический журн. 2010. Т. 56. № 3. С. 341–347.
8. **Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G., Shreiber I.R.** Wave propagation in gas–liquid media. CRC Press, 1993. P. 222. <https://doi.org/10.1017/S0022112094224515>
9. **Таиров Э.А., Покусаев Б.Г., Быкова С.М.** Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц // ТВТ. 2016. Т. 54. № 2. С. 277–286. <https://doi.org/10.7868/S0040364416020228>
10. **Губайдуллин А.А., Ивандяев А.И., Нигматуллин Р.И.** Нестационарные волны в жидкости с пузырьками газа // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226. № 6. С. 1299–1302.
11. **Покусаев Б.Г., Некрасов Д.А., Храмов Д.П.** Экспериментальное исследование и моделирование процесса всплытия и массообмена газовых снарядов в наклонных трубах // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 3. С. 245–249.
12. **Расчет** стационарных и переходных режимов работы ядерного реактора со свинцовым теплоносителем интегральным кодом ЕВКЛИД/VI / А.А. Беллов, В.Н. Васекин, Д.П. Вепрев, В.А. Веретенцев, М.С. Вещунов, Н.А. Мосунова, М.А. Полоус, А.А. Стаханова, В.Ф. Стрижов, А.Г. Муратов, В.В. Тюков // ВАНТ. Сер. Ядерно-реакторные константы. 2015. № 3. С. 91–114.
13. **Паршиков И.А., Соловьев Д.С., Соловьев С.Л.** Расчетный анализ аварийных режимов реакторной установки с использованием теплогидравлического кода КОРСАР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 2. С. 15–26. <https://doi.org/10.26583/npe.2014.2.02>
14. **Benchmark** of delayed equilibrium model (DEM) and classic two-phase critical flow models against experimental data / M. De Lorenzo, Ph. Lafon, J.-M. Seynhaeve, Y. Bartosiewicz // Int. J. Multiphase Flow. 2017. V. 92. P. 112–130. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.03.004>
15. **Vignjevic R., Campbell J.** Review of development of the smooth particle hydrodynamics (SPH) method // Predict. Model. Dyn. Proc. 2009. P. 367–396. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0727-1_20

16. **Monaghan J.J.** Smoothed particle hydrodynamics // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 68. P. 1703–1759. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/8/R01>
17. **Liu M.B., Liu G.R.** Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments // *Arch. Comp. Methods in Eng.* 2010. V. 17. P. 25–76. <https://doi.org/10.1007/s11831-010-9040-7>
18. **Dominguez J.M., Crespo A.J.C., Gomez-Gesteira M.** Optimization strategies for CPU and GPU implementations of a smoothed particle hydrodynamics method // *Comput. Phys. Commun.* 2013. V. 184. Is. 3. P. 617–627. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.10.015>
19. **Kashinsky O.N., Randin V.V.** Downward bubbly gas-liquid flow in a vertical pipe // *Int. J. Multiphase Flow.* 1999. V. 25. P. 109–138. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(98\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00040-8)
20. **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. V. 1382. Paper № 012101. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1382/1/012101>

Exhaustion of a Steam Liquid Flow through a Channel with a Monodispersed Grain Layer

D. P. Khrantsov^{a, b, *}, B. G. Pokusaev^a, D. A. Nekrasov^a, and A. V. Vyazmin^b

^a *Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023 Russia*

^b *MIREA - Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

**e-mail: dp@khrantsov.net*

Abstract—The authors performed 3D numerical simulation of the unsteady outflow of a two-phase liquid-vapor flow from a tube with spherical monodisperse filling. The numerical model was developed by the smoothed particle method, and its verification was carried out using experimental data on the motion of a bubble flow in a tube. The minimum size of smoothed particles and their required number to build a correct computational model have been determined. Structural and hydraulic characteristics of the flow in the presence of phase transitions have been obtained. The calculated data on the three-dimensional spatial distribution of the vapor phase and pressure losses both over the cross section of the unit cell formed by the dispersed backfill and along the entire length of the channel are given. The analysis of the dynamics of changes in pressure losses along the length of the tube has been carried out; two characteristic sections with different dynamics of the growth of pressure losses have been found. Data were obtained on the distribution of the volumetric steam content in the tube at its various positions: horizontal, vertical, and with an inclination of 45°. The influence of the angle of inclination of the tube on the character of the distribution of steam over its cross section is shown. In this case, the greatest difference in the structure is observed between the vertical and horizontal positions. It has also been demonstrated that its structure tends to be homogeneous as the flow moves. The calculation model used made it possible to determine pressure loss in the working section from the inlet of the vapor-liquid flow into the tube to the outlet under conditions corresponding to the onset of the critical flow regime. Comparison of the results of numerical calculations, including the critical mass flow rates at the outflow of a vapor-liquid flow from the tube, with the available experimental data and previously obtained results of analytical studies, noted their good match.

Keywords: critical flows, granular bed, computational fluid dynamics, two-phase flows, phase transitions, monodisperse backfill, volumetric vapor content