

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ВБЛИЗИ ПОГРУЖЕННОГО ДЫРЧАТОГО ЛИСТА^{1, 2}

© 2025 г. А. С. Никулин^{a, *}, С. А. Токарев^a, В. И. Мелихов^a, О. И. Мелихов^{a, b}

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^bАО “Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС”,
ул. Святого Константина, д. 6, г. Электрогорск, Московская обл., 142530 Россия

*e-mail: iskander0215@gmail.com

Поступила в редакцию 21.09.2024 г.

После доработки 07.11.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Одним из основных компонентов атомной электростанции с водо-водяным энергетическим реактором является горизонтальный парогенератор (ПГ), главная задача которого — генерировать заданное количество насыщенного пара, который поступает затем в турбину. Влажность выходящего из ПГ пара не должна превышать предельного значения, чтобы повышенное содержание влаги не приводило к эрозионному износу лопаток турбины. Для обеспечения требуемой влажности в горизонтальных парогенераторах используется гравитационная схема сепарации, важным элементом которой является погруженный дырчатый лист (ПДЛ), предназначенный для выравнивания паровой нагрузки на зеркале испарения. Для разработки математической модели гравитационной сепарации необходимы теоретические и практические знания о процессах образования капель воды на зеркале испарения под динамическим воздействием потока пара. На эти процессы существенное влияние оказывает конструкция погруженного дырчатого листа. В данной работе на экспериментальной установке “Барботер” проведено исследование особенностей течения двухфазного потока вблизи дырчатого листа, а также выполнено численное моделирование этого процесса с помощью кода OpenFOAM. Экспериментальная установка представляла собой заполненный водой сосуд с прозрачными стенками, в нижней части которого подавался воздух, а в средней части был установлен ПДЛ с боковыми закраинами. Проведен эксперимент с общим расходом воздуха 30 дм³/мин, что соответствует скорости 0.94 м/с в отверстии дырчатого листа. В результате обработки материалов фото- и видеосъемки процесса были определены размеры воздушных пузырей, выходящих из дырчатого листа, частота их образования, размеры водяных капель и струй на поверхности раздела. С помощью расчетов в коде OpenFOAM изучалось истечение воздуха через одно отверстие дырчатого листа с последующим образованием струй и капель воды на поверхности раздела. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошее качественное и количественное совпадение значений основных параметров.

Ключевые слова: двухфазный поток, математическое моделирование, горизонтальный парогенератор, погруженный дырчатый лист, барботаж

DOI: 10.56304/S0040363624601015

Горизонтальные парогенераторы, установленные на атомных электростанциях с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР), предназначены для выработки насыщенного пара [1, 2]. Ключевым параметром является влажность уходящего в турбину пара, которая не должна превышать предельного значения 0.2%. В про-

тивном случае капли влаги, присутствующие в расширяющемся в турбине потоке пара, оказывают эрозионное воздействие на лопатки турбины, что приводит к их быстрому износу и выходу из строя.

Для обеспечения требуемого значения влажности в горизонтальных ПГ используется гравитационная схема сепарации, основанная на заметном различии удельных весов пара и воды. При довольно большой высоте парового пространства значительное количество крупных капель воды, вынесенных потоком пара с поверхности испарения вверх, успевает вновь вернуться

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00793), <https://rscf.ru/project/22-19-00793/>

² Расчеты проводились на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН. <https://www.jscc.ru/>

туда. К пароотводящим трубам подходит лишь небольшое количество капель, удельный вес которых настолько мал, что силы гравитации не могут преодолеть динамический напор парового потока.

Однако в горизонтальном ПГ пар образуется неравномерно: вблизи входного (горячего) коллектора количество генерируемого пара наибольшее, а у выходного (холодного) коллектора — наименьшее. Из-за неравномерности паровой нагрузки на зеркале испарения эффективность гравитационной сепарации снижается, поскольку в этом случае высоту парового объема, требуемого для обеспечения заданной влажности пара, необходимо определять по наибольшей скорости пара, которую он имеет в области горячего коллектора, хотя для остальной части зеркала испарения такая значительная высота не нужна. Поэтому желательно выравнивать паровую нагрузку на зеркале испарения. Для этой цели над трубными пакетами устанавливают погруженный дырчатый лист, снабженный закраинами. Он имеет большой коэффициент гидравлического сопротивления, что обуславливает выравнивание паровой нагрузки.

В настоящее время для практического расчета влажности пара используются полуэмпирические формулы, разработанные на основе имеющихся экспериментальных данных. Первая подобная формула была предложена Г.Н. Кружилиным [3]. Он предположил, что капли на зеркале испарения образуются при воздействии кинетической энергии потока пара, и, используя теорию размерностей, получил выражение для влажности в зависимости от других параметров. Значения коэффициентов в этом выражении были найдены путем сопоставления с экспериментальными данными.

В [4] применен схожий метод, при этом автор учел большее количество факторов и при разработке формулы использовал значительно больше экспериментальных данных по уносу влаги. Полученная им зависимость до сих пор применяется многими исследователями.

В [5] авторы разработали набор формул на основе механистического подхода, в котором постарались учесть известные закономерности для ключевых явлений сепарации (механизм образования капель, их распределение по размерам и скоростям на зеркале испарения и движение капель в потоке пара). Для валидации выведенных ими формул авторы использовали все имевшиеся на тот момент экспериментальные данные по уносу влаги для водовоздушных и пароводяных смесей, в том числе и результаты, полученные советскими учеными.

В [6] было показано, что формула Катаоки — Ишии дает результаты, наилучшим образом, по

сравнению с другими соотношениями, соответствующие экспериментальным данным по уносу влаги.

Следует также отметить работу [7], в которой на основе анализа опытных данных была получена эмпирическая формула для расчета уноса влаги, применимая для различных режимов двухфазного потока (от пузырькового до эмульсионного), при разных геометрических параметрах в широком диапазоне приведенных скоростей пара (от 0.05 до 5.0 м/с).

Несмотря на наличие формул для расчета уноса влаги, необходимо разрабатывать также модели гравитационной сепарации на основе полностью механистического подхода (“из первых принципов”). В [8] была предложена модель сепарации, реализованная в коде STEG, однако движение капель в паровом пространстве моделировалось упрощенно. В [9, 10] лагранжева модель движения капель была внедрена в CFD-код. В результате были определены основные особенности течения пара в паровом объеме парогенератора и траектории движения капель различного размера. Однако ключевые параметры капель, образующихся на зеркале испарения, такие как диаметр капли и ее начальная скорость, задавались с помощью эмпирических зависимостей, а само зеркало испарения полагалось плоским.

Наиболее перспективным направлением моделирования гравитационной сепарации, с точки зрения авторов настоящей работы, является прямое численное моделирование течения двух несмешивающихся фаз (жидкость и газ), отделенных одна от другой поверхностями раздела. Для отслеживания эволюции межфазных поверхностей имеются различные методы, наиболее распространенным из которых можно считать метод VOF (Volume of Fluid) [11, 12]. В [13, 14] этот метод был успешно применен для моделирования восходящего движения пузырьков в воде, всплытия их на поверхность и образования водяных струй и капель. Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало хорошее их совпадение. Помимо VOF используются и другие методы выделения межфазных поверхностей для решения подобных задач [15–17].

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования и расчетного моделирования с использованием метода VOF движения двухфазного водовоздушного потока ниже и выше ПДЛ вплоть до отрыва водяных капель/струй с поверхности раздела и их уноса в воздушное пространство. Целью исследования являлась проверка с помощью полученных экспериментальных данных адекватности результатов моделирования гидродинамических процессов, характерных для гравитационной сепарации.



Рис. 2. Общий вид процесса барботажу пузырьков воздуха и образования водяных капель и струй на поверхности раздела

В начальный момент времени сосуд был заполнен водой на 60 мм выше ПДЛ. Длительность эксперимента составляла около 100 с. Общая картина процесса показана на рис. 2. В результате подачи воздуха из раздающих коробов формируются пузырьки, движущиеся вверх. Достигнув ПДЛ, воздух растекается по нижней поверхности листа, создавая воздушную подушку. Затем через отверстия ПДЛ воздух поступает вверх и опять в виде пузырьков “пробулькивает” через слой воды, находящийся над ПДЛ. И, наконец, достигнув поверхности раздела, устремляется вверх и покидает рабочий участок. При этом на поверхности раздела образуются струи и капли воды различного размера, подскакивающие вверх на некоторую высоту.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

В погруженном дырчатом листе экспериментальной установки имеются четыре отверстия, расположенных симметрично относительно центра. Это позволяет моделировать не всю установку, а лишь ее четвертую часть с одним отверстием. При этом в отверстие поступает одна четвертая часть общего расхода воздуха. Рассматривается течение двухфазной смеси в области над ПДЛ. Таким образом, расчетная область (рис. 3) представляет собой параллелепипед длиной 345 мм, шириной 150 мм и высотой 300 мм. В начальный момент времени эта область заполняется водой на высоту 60 мм, над водой находится воздух. В

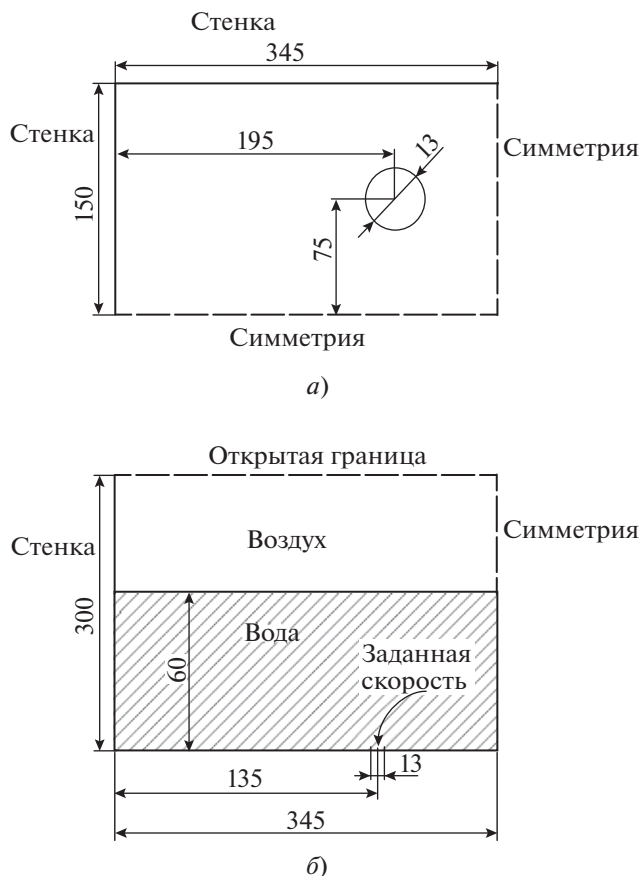


Рис. 3. Расчетная область и граничные условия. а – вид сверху; б – вид сбоку

нижней части расчетной области имеется круглое отверстие диаметром 13 мм, через которое подается воздух с расходом $7.5 \text{ дм}^3/\text{мин}$, что соответствует средней скорости воздуха в отверстии 0.94 м/с .

В табл. 1 приведены параметры воды и воздуха, при которых проводились расчеты.

Число Рейнольдса, определенное по расходу воздуха и диаметру входного отверстия, равнялось 811.

Для создания математической модели использовался код CFD класса OpenFOAM [17], предназначенный для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также для визуализации этих течений методами компьютерной графики. С помощью OpenFOAM можно имитировать стационарные и нестационарные, сжимаемые, слабосжимаемые и несжимаемые потоки жидкости и газа. Применяя различные модели турбулентности и адаптивную расчетную сетку, можно моделировать сложные движения жидкости, в том числе течения с сильной закруткой, горением, течения со свободной поверхностью.

Поскольку скорости движения воды и пара в рассматриваемой задаче малы по сравнению с

Таблица 1. Параметры воды и воздуха, при которых проводились расчеты

Параметр	Вода	Воздух
Плотность, кг/м ³	997.050	1.205
Динамический коэффициент вязкости, Па · с	8.94×10^{-4}	1.85×10^{-5}
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	71.97×10^{-3}	—

характерными скоростями звука в данной системе и тепловые эффекты не учитываются, то сжимаемостью сред можно пренебречь и принимать их как несжимаемые. Гидродинамическое взаимодействие воды и воздуха происходит на подвижной межфазной границе, которая может приобретать весьма сложную форму. Для моделирования таких течений используется метод VOF [11, 12], суть которого состоит в замене двух несмешивающихся жидкостей, имеющих разные свойства, одной эффективной жидкостью с переменными свойствами, зависящими от объемных долей фаз. Изменения объемных долей фаз находят при решении соответствующих уравнений переноса.

Система определяющих уравнений формулируется следующим образом. Если объемную долю воды обозначить α , тогда в расчетной ячейке, заполненной водой, $\alpha = 1$, а в ячейке, заполненной паром, $\alpha = 0$. Если в ячейке проходит граница раздела между паром и водой, то $0 < \alpha < 1$. Уравнение переноса объемной доли воды имеет вид

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0, \quad (1)$$

где t — время; x_j — j -я пространственная координата; u_j — j -я компонента скорости.

Свойства эффективной жидкости (плотность ρ и динамический коэффициент вязкости μ) в методе VOF определяются как

$$\rho = (1 - \alpha)\rho_g + \alpha\rho_l; \quad (2)$$

$$\mu = (1 - \alpha)\mu_g + \alpha\mu_l. \quad (3)$$

Здесь индекс g обозначает газ (пар), l — жидкость (воду).

Для эффективной жидкости (двухфазной среды) решаются уравнения неразрывности и импульса:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ & = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \mu g_i + F_{\sigma i}, \end{aligned} \quad (5)$$

где p — давление; g_i — ускорение свободного падения в i -м направлении; $F_{\sigma i}$ — сила поверхностного натяжения на границе раздела фаз вдоль i -го направления.

В настоящей работе тепловые эффекты при взаимодействии жидкостей не учитываются, поэтому уравнение энергии не рассматривается, а свойства фаз (плотность и вязкость) считаются постоянными.

Сила поверхностного натяжения, действующая на границе раздела фаз, в методе VOF преобразуется в эквивалентную объемную силу, сосредоточенную в пределах распределенного переходного слоя между фазами. Используется широко распространенная модель CSF (Continuum Surface Force) [18], согласно которой эта сила вычисляется как

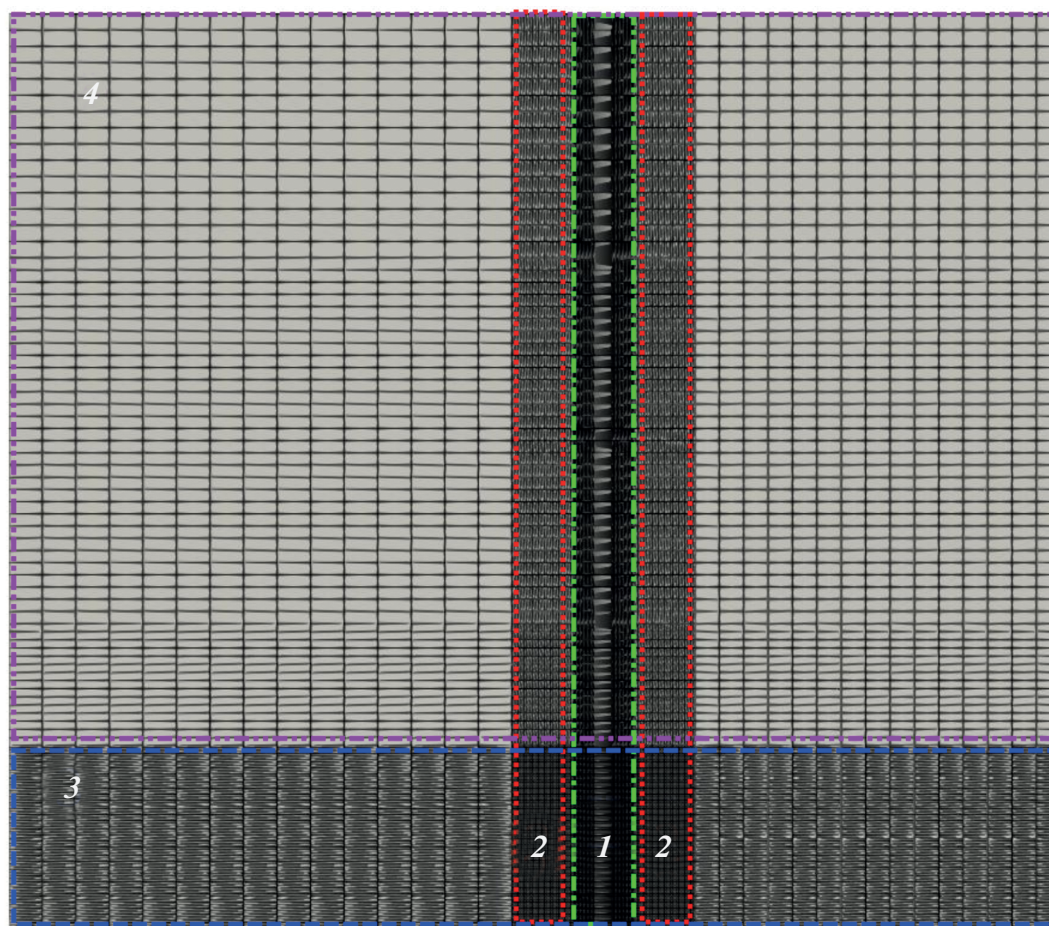
$$F_{\sigma i} = \sigma \kappa \frac{\partial \alpha}{\partial x_i}; \quad \kappa = -\frac{\partial n_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \alpha / \partial x_i}{|\partial \alpha / \partial x_i|} \right), \quad (6)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; κ — кривизна межфазной поверхности, определенная через дивергенцию единичной нормали n к поверхности, которая, в свою очередь, вычисляется через градиент объемной доли.

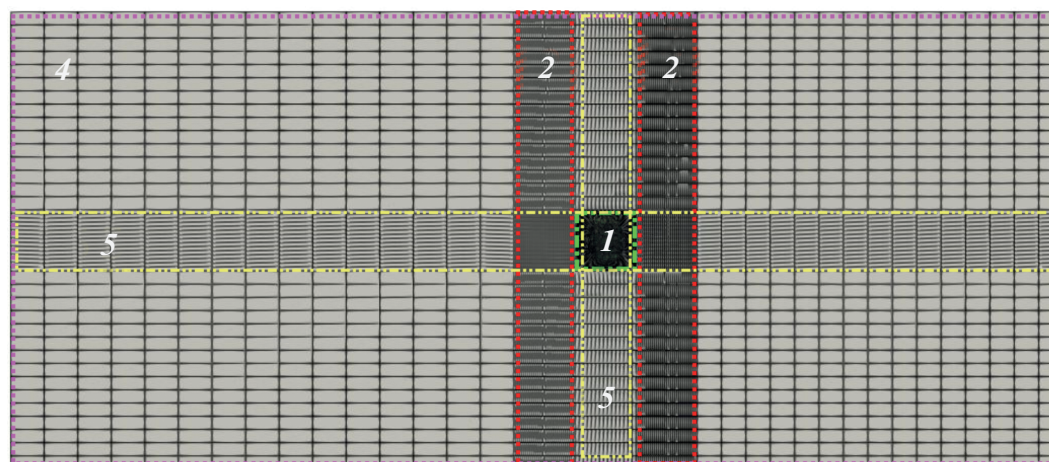
Основным расчетным модулем для двухфазных задач в коде OpenFOAM является interFoam, позволяющий проводить гидродинамический анализ методом VOF для двух несжимаемых жидкостей без учета фазовых переходов. Для построения расчетной сетки применялся пакет Salome [19]. На первом этапе была построена расчетная сетка, включавшая в себя 1 млн контрольных объемов со сгущением в направлении к входному отверстию (рис. 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для анализа динамики процесса барботажа и оценки таких важных параметров, как размеры пузырей водяных капель и струй, частота образования пузырей, было смоделировано время около 5 с истечения воздушного потока через отверстие ПДЛ. На рис. 5, 6 приведены картины образования пузырей воздуха и водяных структур (струй/капель) в различные моменты времени с разных точек обзора: вид на поверхность воды снизу (движение пузырей), вид на поверхность воды сверху (формирование водяных структур) и



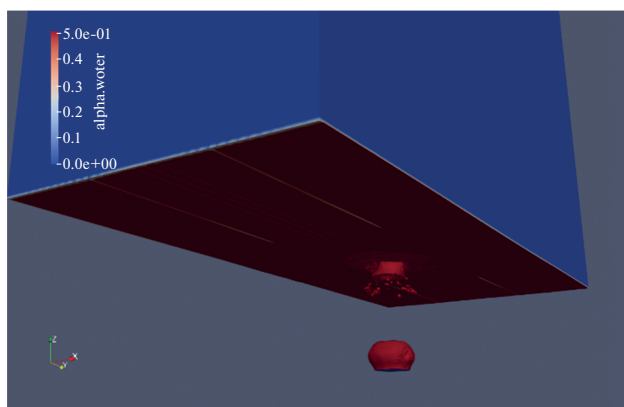
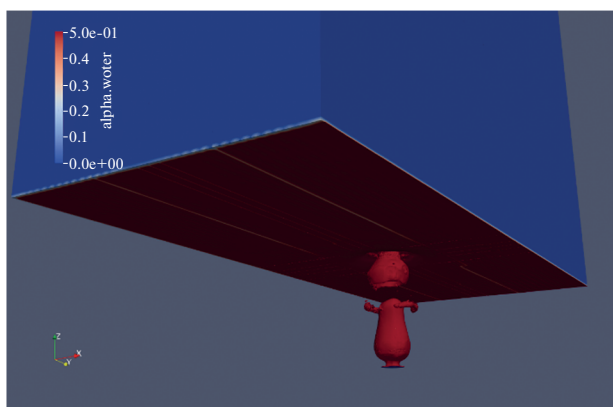
а)



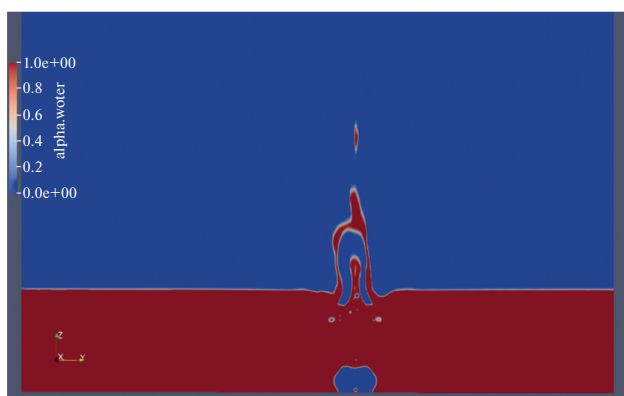
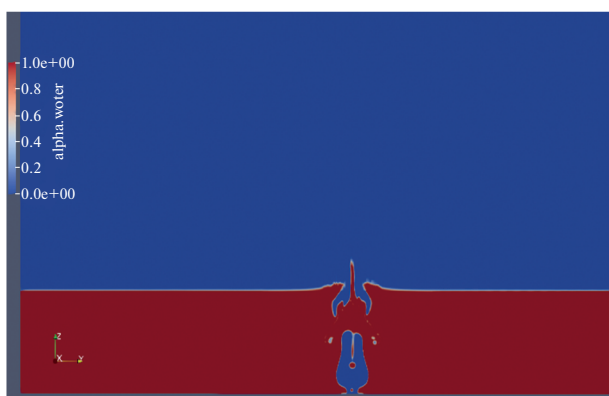
б)

Рис. 4. Вид сбоку (а) и сверху (б) расчетной сетки, состоящей из 1 млн ячеек. Область: 1 – сетка в зоне входного отверстия с размерами ячеек от 0.50 до 1.00 мм; 2 и 5 – градиентные сетки с размерами ячеек от 0.50 до 1.25 мм для плавного перехода от мелких к крупным расчетным ячейкам; 3 – сетка в слое воды с размерами ячеек от 0.50 до 8.00 мм; 4 – сетка в зоне воздуха с размерами ячеек от 1.25 до 8.00 мм

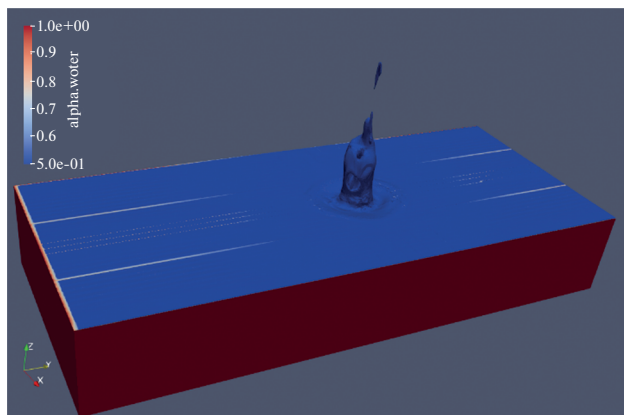
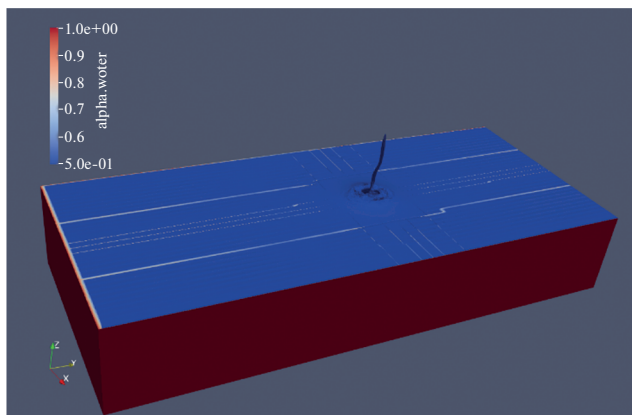
Под поверхностью воды



Вид сбоку



Над поверхностью воды



а)

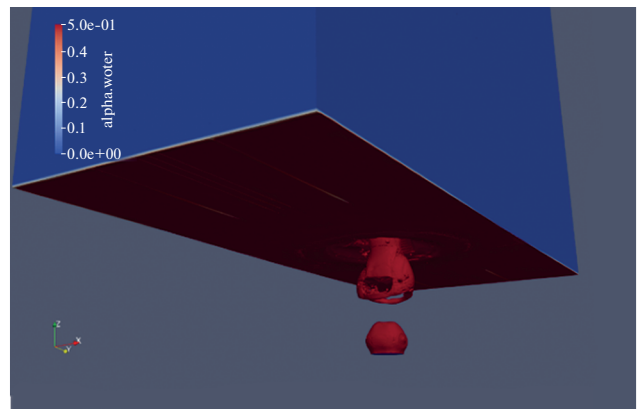
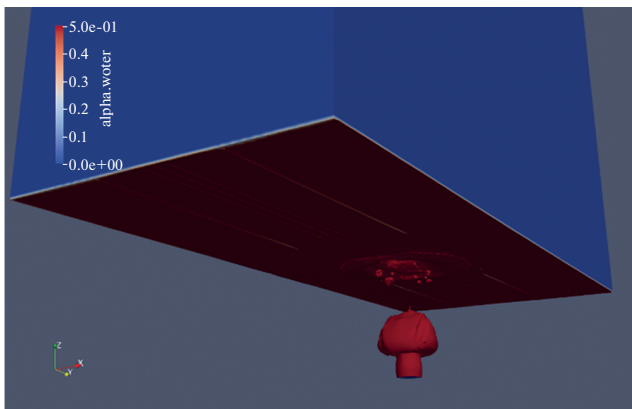
б)

Рис. 5. Подъем воздушного пузыря, образование водяной струйки и капли при $t = 0.15$ (а) и $t = 0.20$ с (б)

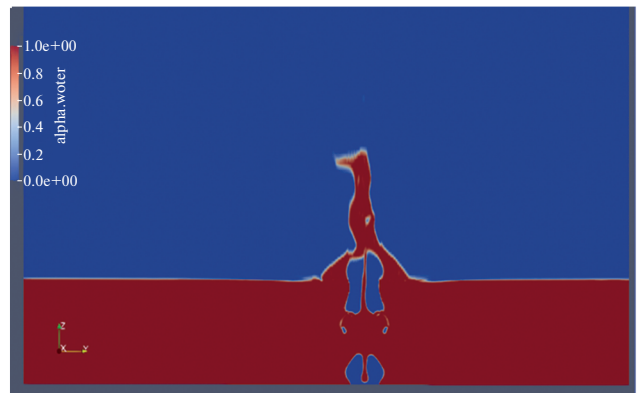
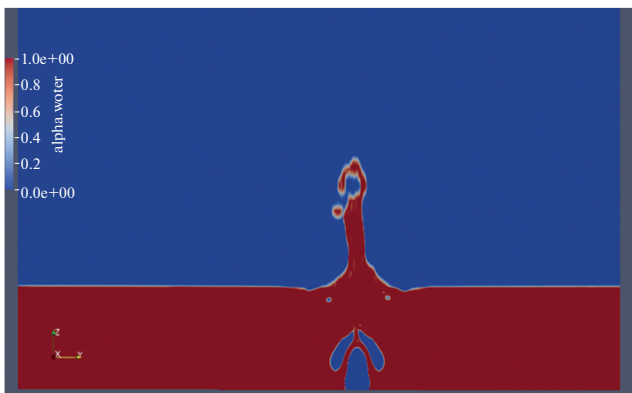
вид сбоку (поперечный разрез через центр отверстия), где одновременно видны положения пузырей и струй/капель. Сначала на выходе из отверстия образуется пузырь воздуха и всплывает вверх. При достижении межфазной поверхности ($t = 0.15$ с) пу-

зырь схлопывается и появляется водяная струйка, от которой отрывается капля ($t = 0.20$ с), которая впоследствии падает обратно на межфазную поверхность (см. рис. 5). Затем струйка воды начинает оседать вниз ($t = 0.25$ с), капля воды также

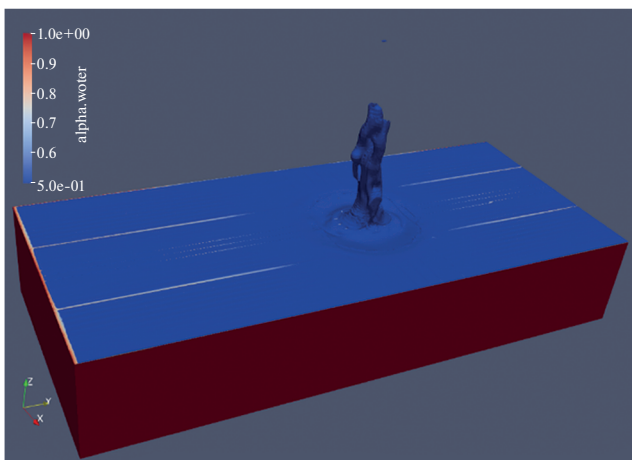
Под поверхностью воды



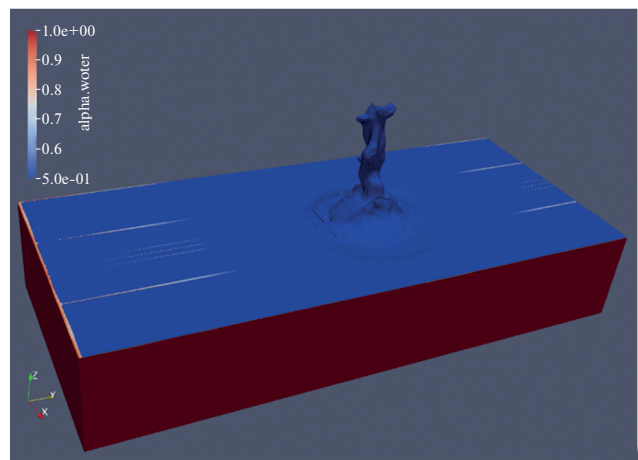
Вид сбоку



Над поверхностью воды



а)



б)

Рис. 6. Подъем воздушного пузыря, образование водяной струи и капли при $t = 0.25$ (а) и $t = 0.30$ с (б)

возвращается вниз на межфазную поверхность, далее к поверхности раздела подходит следующий пузырь (см. рис. 6), и процесс повторяется с небольшими отличиями, вызванными стохастической природой процесса.

На рис. 7, 8 показаны характерные формы воздушных пузырей и водяных струй, зафиксированных в эксперименте и полученных при расчете. Следует отметить, что течение воздушного потока нестационарное, при этом размеры

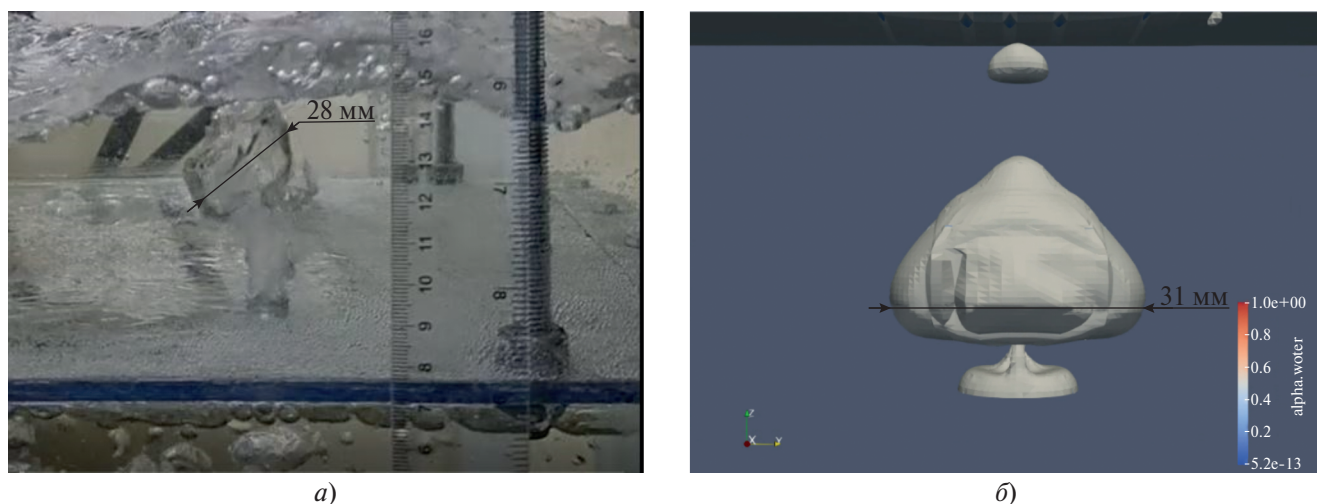


Рис. 7. Воздушный пузырь, наблюдавшийся в эксперименте (а) и полученный в результате расчета (б)

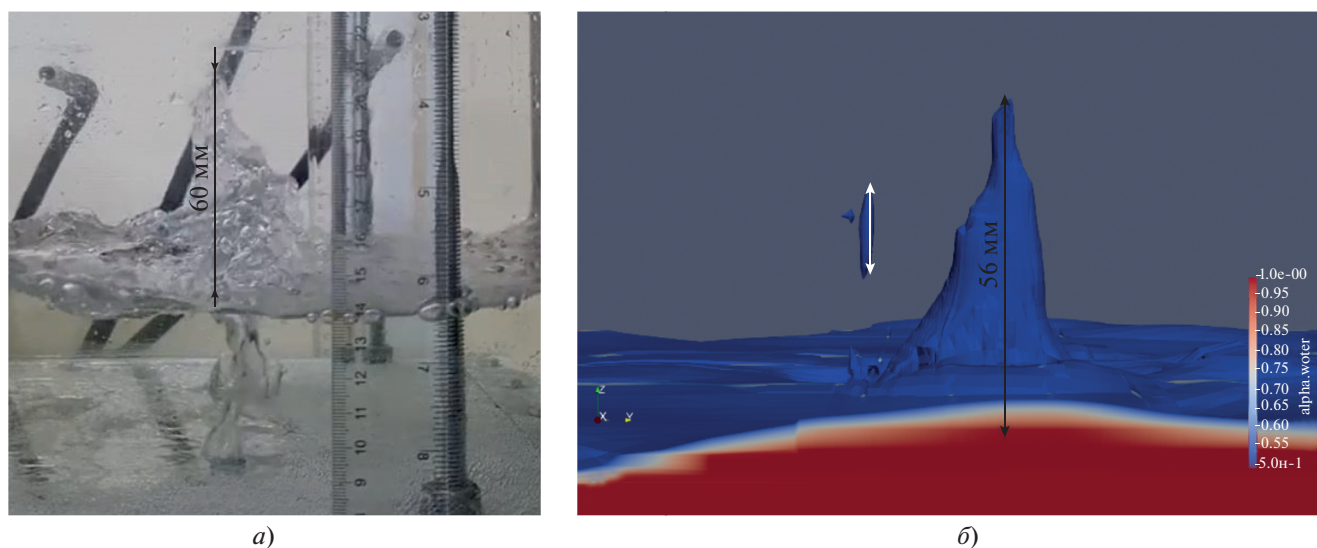


Рис. 8. Водяная струйка, наблюдавшаяся в эксперименте (а) и полученная в результате расчета (б)

образующихся пузырей в эксперименте варьируются от 25 до 33 мм, а в расчете — от 30 до 33 мм. Кроме того, форма пузырей как в экспериментах, так и при расчете оказалась несферической, поэтому характерный размер определяли приблизительно, исходя из общей визуальной картины.

Анализ уровней всплесков воды над поверхностью раздела, полученных в результате расчетного моделирования, показал, что высота водяных струй варьируется от 35 до 66 мм, однако единичные всплески могут подниматься до 115 мм. В эксперименте высота большей части всплесков водяных струй находилась в диапазоне 30–65 мм, но отдельные всплески могли достигать 95 мм.

В некоторых случаях водяные струйки дробятся с образованием одной или нескольких капель. На рис. 9 показаны характерные капли воды, полученные в эксперименте и при расчете. Размер капель как при расчете, так и в эксперименте составлял примерно 10 мм, однако в целом он изменялся в довольно широком диапазоне: от 2 до 20 мм в эксперименте и от 4 до 27 мм при расчете.

На втором этапе исследования было изучено влияние локальной адаптации расчетной сетки по границе раздела фаз, которая проводилась на каждом расчетном шаге с помощью опции *dynamicMeshDict*, на структуру двухфазного течения. Реализация локальной адаптации в коде

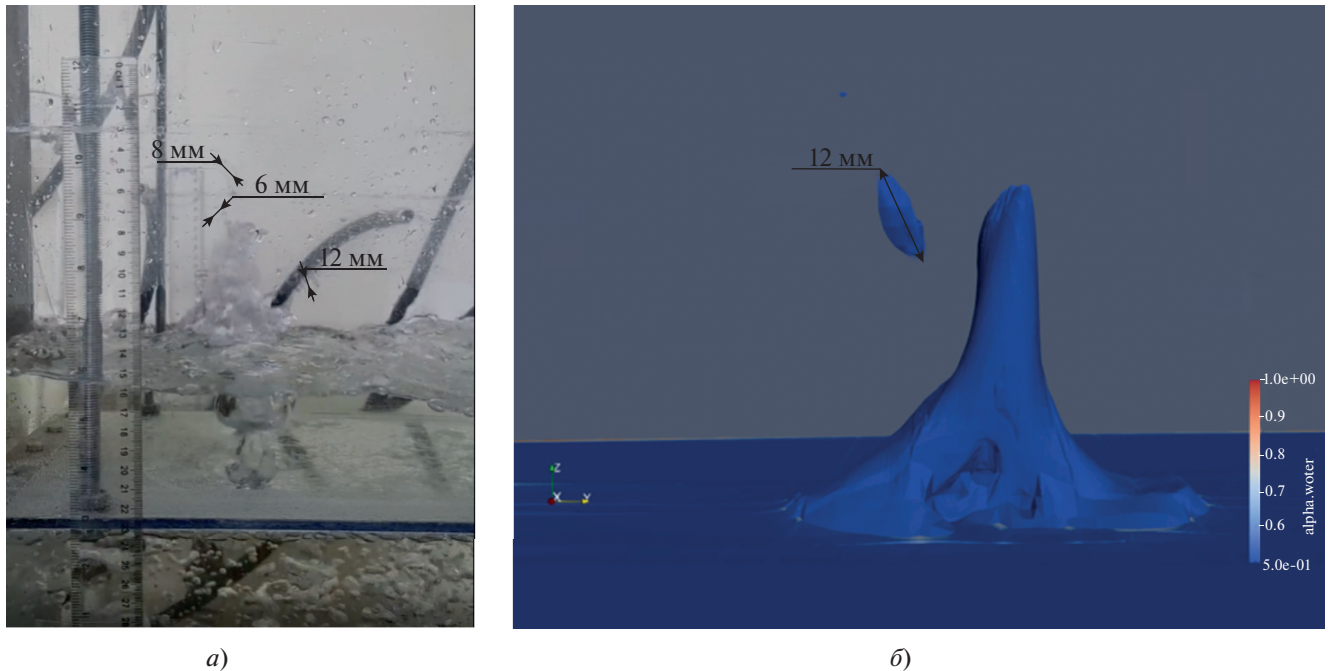


Рис. 9. Капли, наблюдавшиеся в эксперименте (а) и полученные при моделировании (б)

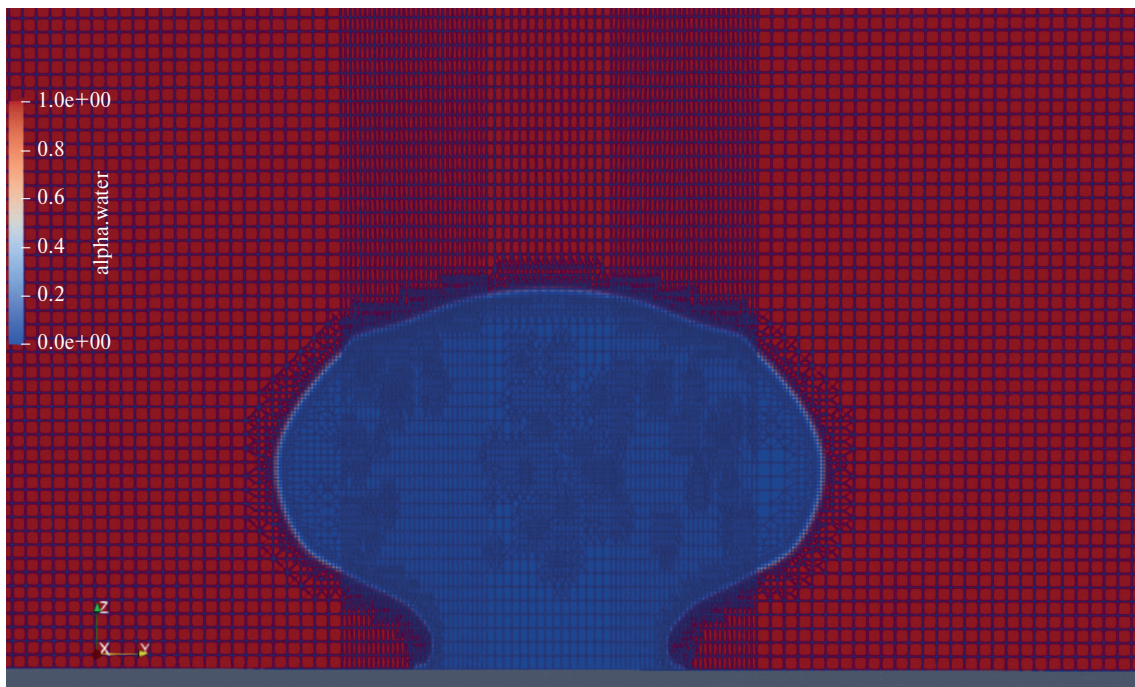


Рис. 10. Адаптивная сетка по границе раздела фаз. Момент времени $t = 0.05$ с

OpenFOAM осуществлялась следующим образом. В начальный момент около межфазных границ создавалась мелкая сетка, которая затем по мере эволюции пузырей/капель двигалась вместе с межфазными границами. Таким образом, меж-

фазные границы все время были окружены областью, разбитой на мелкие ячейки. Это позволило избежать их выхода на более грубую сетку с последующей обратной переинтерполяцией на мелкую сетку, что привело бы к размазыванию по-

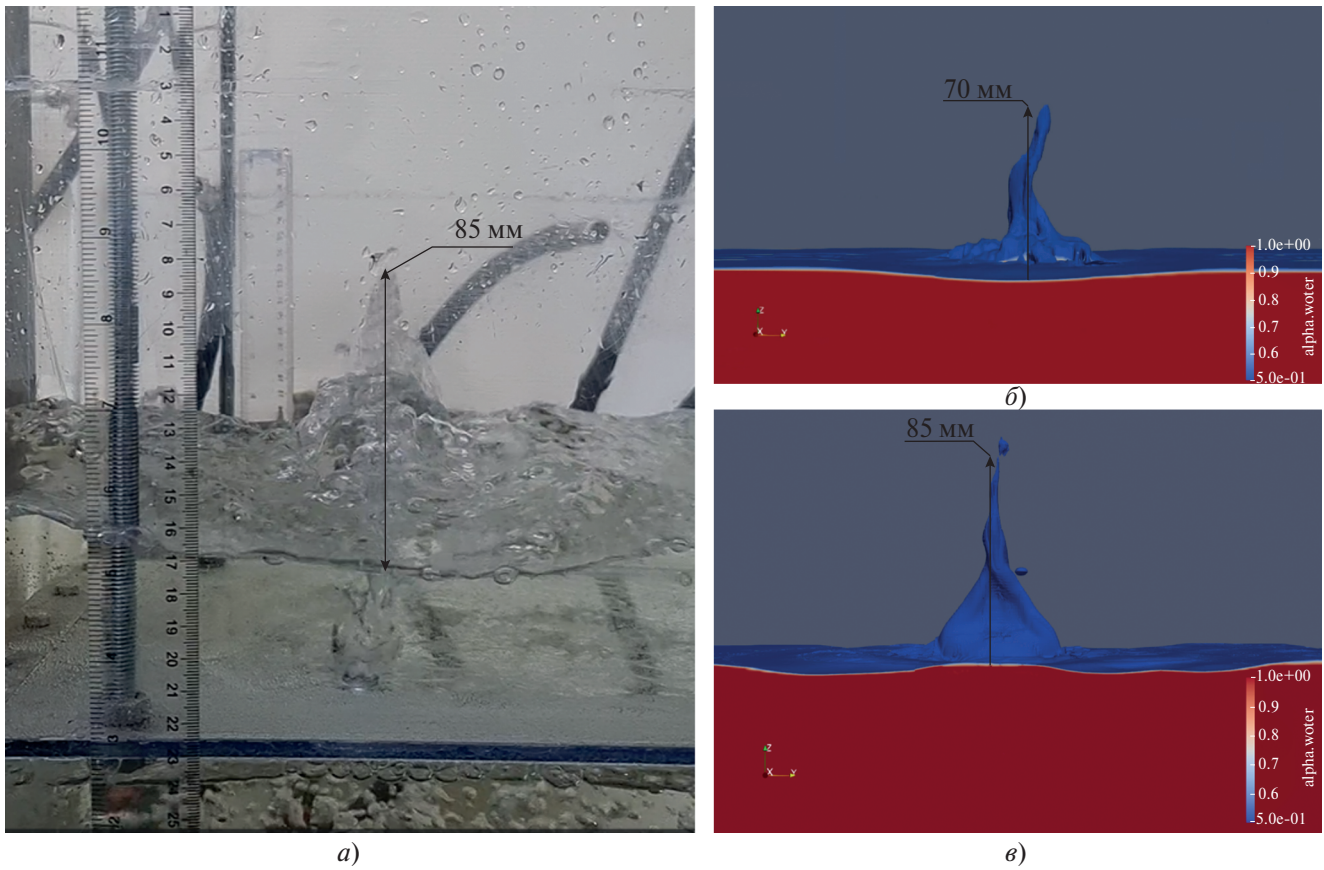


Рис. 11. Характерный размер большого всплеска.
а — эксперимент; б — результат моделирования с помощью статической (неподвижной) сетки; в — результат моделирования с помощью адаптивной (подвижной) сетки

верхности раздела. Общее количество расчетных ячеек было ограничено 2 млн. Ячейки по границе межфазной поверхности разбивались на два слоя адаптации (рис. 10).

Расчет с использованием адаптивной сетки дает возможность выявить более тонкую структуру двухфазного течения. На рис. 11 показано, что адаптивная сетка, по сравнению со статической

(неподвижной), позволяет воспроизвести вид водяной струйки, более соответствующей экспериментальному.

В табл. 2 представлены количественные характеристики процесса барботажа и образования водяных струй и капель, полученные в эксперименте и при расчете. В целом прослеживается хорошее совпадение результатов расчетов, полученных с

Таблица 2. Экспериментальные и рассчитанные параметры процесса барботажа и образования водяных струй и капель

Параметр	Эксперимент	OpenFOAM	
		без адаптации	с адаптацией
Размер пузырей, мм	25–33	30–33	31–36
Частота образования пузырей/струй, шт/с	6–8	8	9
Размер, мм:			
водяных капель	2–20	4–27	3–17
струй	30–95	35–115	37–85

использованием как статической, так и адаптивной динамической сетки, с экспериментальными данными.

ВЫВОДЫ

1. В процессе экспериментально-расчетного исследования двухфазного водовоздушного потока вблизи погруженного дырчатого листа была выявлена сложная нестационарная картина течения, состоящая в периодическом всплывании пузырей воздуха из отверстия ПДЛ, которые по достижении ими межфазной поверхности схлопываются и вызывают образование водяных струй и капель, устремляющихся вверх в воздушное пространство.

2. Динамическая адаптивная сетка позволила получить более тонкие дисперсные структуры (пузыри, водяные струи и капли).

3. Результаты моделирования, проведенного на статической (неподвижной) и динамической адаптивной сетках, близки между собой и удовлетворительно описывают данные эксперимента.

4. Исследования, выполненные с помощью CFD-кода OpenFOAM и VOF-метода, показали адекватность результатов моделирования гидродинамических процессов, характерных для гравитационной сепарации, и полученных экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трунов Н. Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. Сорокин В.В. Парогенераторы АЭС. Минск: Вышэйшая школа, 2020.
3. Кружилин Г.Н. Зависимость допустимой нагрузки парового объема котла от давления // Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. 1951. № 7. С. 1106–1114.
4. Стерман Л.С. К теории паросепарации // ЖТФ. 1958. Т. 28. Вып. 7. С. 1562–1574.
5. Kataoka I., Ishii M. Mechanistic modeling of pool entrainment phenomenon // Int. J. Heat Mass Transfer. 1984. V. 27. Is. 11. P. 1999–2014. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90187-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90187-X)
6. Entrainment phenomenon in gas-liquid two-phase flow: A review / R.K. Bagul, D.S. Pilkhwal, P.K. Vijayan, J.B. Joshi // Sadhana. 2013. V. 38. P. 1173–1217. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0193-6>
7. Ouallal M., Leyer S., Gupta S. A correlation for pool entrainment phenomenon // Nucl. Eng. Des. 2021. V. 383. P. 111386. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111386>
8. Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I. Numerical analysis of the equalization capability of submerged perforated sheets for WWER-1500 horizontal steam generator // Ann. Nucl. Energy. 2021. V. 157. P. 108242. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108242>
9. Голибродо Л.А. Математическое моделирование сепарации пара в парогенераторах АЭС с ВВЭР на основе исследования тепломассообмена с использованием CFD-кодов: дис. ... канд. техн. наук. Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2017.
10. Горбунов В.А., Лоншаков Н.А., Мечтаева М.Н. Разработка модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М // Вестник ИГЭУ. 2020. Вып. 3. С. 5–15. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2020.3.005-015>
11. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // J. Comput. Phys. 1981. V. 39. Is. 1. P. 201–225. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
12. Tryggvason G., Scardovelli R., Zaleski S. Direct numerical simulations of gas-liquid multiphase flow. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511975264>
13. Lu M., Xie H. An investigation of pool entrainment based on the method of Volume of Fluid // Nucl. Eng. Des. 2017. V. 318. P. 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2017.04.006>
14. Liao Y., Li J., Lucas D. Investigation on pool-scrubbing hydrodynamics with VOF interface-capturing method // Nucl. Eng. Des. 2022. V. 390. P. 111713. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111713>
15. Jet formation in bubbles bursting at a free surface / L. Duchemin, S. Popinet, C. Josserand, S. Zaleski // Phys. Fluids. 2002. V. 14. Is. 9. P. 3000–3008. <https://doi.org/10.1063/1.1494072>
16. Numerical simulation of periodic bubble formation at a submerged orifice with constant gas flow rate / D. Gerlach, N. Alleborn, V. Buwa, F. Durst // Chem. Eng. Sci. 2007. V. 62. Is. 7. P. 2109–2125. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.12.061>
17. Simmons J.A., Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. The formation of a bubble from a submerged orifice // Eur. J. Mech. – B/Fluids. 2015. V. 53. P. 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2015.01.003>
18. Официальный сайт OpenFOAM: <https://www.openfoam.org/> (Дата обращения 25.08.2024.)
19. Brackbill J., Kothe D., Zemach C. A continuum method for modeling surface tension // J. Comput. Phys. 1992. V. 100. Is. 2. P. 335–354. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
20. Salome. Computer software: <https://www.salome-platform.org/> (Дата обращения 25.08.2024.)

Investigation of a Two-Phase Flow Near a Submerged Perforated Sheet

A. S. Nikulin^{a, *}, S. A. Tokarev^a, V. I. Melikhov^a, and O. I. Melikhov^{a, b}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b AO Elektrogorsk Research and Engineering Center for NPP Safety (AO ENITs), Elektrogorsk, 142530 Russia

*e-mail: iskander0215@gmail.com

Abstract—One of the main components of a nuclear power plant with a water-moderated water-cooled power reactor (VVER) is a horizontal steam generator (SG), whose main service is to generate the specified amount of saturated steam, which then enters the turbine. The steam wetness at the SG outlet should not exceed the maximum allowable value so that the elevated moisture content would not lead to erosive wear of the turbine blades. To maintain the required wetness, horizontal steam generators are equipped with a gravity separation system, whose essential component is a submerged perforated sheet (SPS) designed for equalizing the steam load on the evaporation surface. Elaboration of a mathematical model of the gravity separation requires theoretical and practical knowledge about the processes of water droplet formation on the evaporation surface under the dynamic impact of the steam flow. These processes depend crucially on the SPS design. This work included a study of the features of a two-phase flow near a perforated sheet, which was conducted at the Barboter experimental facility, and a numerical simulation of this process using the OpenFOAM code. The experimental facility was a water-filled vessel with transparent walls. Air was supplied into the vessel from the bottom, and an SPS with side flanges was installed in the middle of the vessel. An experiment was carried with a total air flowrate of 30 dm³/min giving a velocity of 0.94 m/s in the perforated sheet holes. Processing of photo and video records of the process yield dimensions of air bubbles moving out of the perforated sheet, the frequency of their formation, and sizes of water droplets and jets at the interface. The OpenFOAM code was used for the numerical study of air discharge through one hole of the perforated sheet with subsequent formation of water jets and droplets at the interface. The predictions demonstrate a good qualitative and quantitative agreement with the experimental values of the main parameters.

Keywords: two-phase flow, mathematical simulation, horizontal steam generator, submerged perforated sheet, bubbling