

ВАЛИДАЦИЯ КОДА STEG НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ГИДРОДИНАМИКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА¹

© 2024 г. Х. Абди^а, Н. Урегани Джафари^а, В. И. Мелихов^{а, б, *}, О. И. Мелихов^{а, б}

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

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

*e-mail: MelikhovVI@mpei.ru

Поступила в редакцию 20.10.2023 г.

После доработки 24.11.2023 г.

Принята к публикации 29.11.2023 г.

Расчетный анализ экспериментов по исследованию гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе выполнен с помощью кода STEG (STEam Generator). Основными компонентами экспериментальной модели являлись шахматный трубный пучок, погруженный дырчатый лист (ПДЛ) с краинами и опускной канал. В качестве двухфазной среды использовали водовоздушную смесь. Движение среды в модели осуществлялось благодаря естественной циркуляции, которая обеспечивалась подачей воздуха в нижнюю, среднюю и верхнюю части трубного пучка. Измерение объемного газосодержания проводили методом γ -просвечивания. Помимо этого измеряли перепады давления по высоте трубного пучка и уровни воды в модели и над ПДЛ. Каждый эксперимент выполняли при заданных нагрузке воздуха на зеркало испарения и уровне воды в модели. Код STEG разработан на кафедре атомных электростанций НИУ МЭИ для моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе. Математическая модель базируется на двухжидкостном подходе к описанию двухфазного потока с использованием балансовых уравнений сохранения массы, импульса и энергии и полуэмпирических замыкающих соотношениях для межфазных взаимодействий и взаимодействий с различными окружающими конструкциями (трубный пучок, стенки и т.п.). С помощью кода STEG выполнены расчеты девяти экспериментальных режимов, различающихся степенью перфорации погруженного дырчатого листа и расходом подаваемого воздуха. Установлены качественные закономерности циркуляции двухфазной водовоздушной среды в модели горизонтального парогенератора и влияние на нее экспериментальных значений основных параметров. Количественные результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных свидетельствуют о хорошем их совпадении, относительные погрешности расчета объемной доли воздуха и перепадов давления не превышают 10%.

Ключевые слова: горизонтальный парогенератор, трубный пучок, погруженный дырчатый лист, перфорация, моделирование, расчетный код, двухфазное течение, гидравлическое сопротивление, межфазное взаимодействие, валидация, водовоздушная среда

DOI: 10.56304/S0040363624050011

Одним из основных компонентов атомной электростанции с реактором, охлаждаемым водой под давлением, является парогенератор (ПГ), конструкция которого во многом определяет компоновку АЭС, ее стоимость и надежность. Исторически в СССР и США (странах, заложивших основы ядерной энергетики) сложились принципиально отличные схемные и конструкторские подходы к созданию парогенераторов:

вертикальных на АЭС с реакторами западного типа PWR и горизонтальных на АЭС с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) [1]. При выборе той или иной конструкции парогенераторов в 1950–1960 гг. принимались во внимание технико-экономические показатели, размещение оборудования в составе реакторной установки, наличие освоенной технологии изготовления и эксплуатации теплообменных аппаратов традиционной энергетики. По итогам 40-летней эксплуатации парогенераторов и опыта их модернизации специалисты ОКБ “Гидропресс” детально проанализировали достоинства и недостатки вертикальных и горизонтальных аппара-

¹ Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 22-19-00793 “Исследование гидродинамики двухфазных потоков в горизонтальном парогенераторе с целью оптимизации его конструкции”. <https://rscf.ru/project/22-19-00793/>

тов [2]. Было отмечено, что эволюция конструкций парогенераторов обоих типов происходила, как правило, вследствие возникновения в процессе эксплуатации нештатных ситуаций, когда выявлялись слабые места конструкций, которые в дальнейшем следовало устранять. Главный вывод, сделанный авторами [2] на основе опыта многолетней эксплуатации, состоит в том, что горизонтальные парогенераторы обладают преимуществами по сравнению с вертикальными, среди которых выделяют следующие:

простая гравитационная схема сепарации, реализуемая вследствие умеренной паровой нагрузки на зеркале испарения;

отсутствие опасности вибрации теплообменных труб и повреждения от посторонних предметов в связи с низкой скоростью среды во II контуре;

исключение накопления шламовых отложений на поверхности коллекторов I контура и снижение опасности коррозионного повреждения теплообменных труб в области заделки благодаря вертикальному расположению коллекторов и др.

Наиболее серьезным недостатком вертикального ПГ является наличие горизонтальной трубной доски, над которой скапливается шлам. Предотвратить коррозию труб в этой зоне можно, если избавиться от шлама. Для этого необходима регулярная и тщательная механическая либо химическая очистка. В горизонтальных ПГ шлам оседает в нижней части корпуса вне трубного пучка и может быть легко удален.

Тем не менее, несмотря на выявленные преимущества горизонтальных ПГ, в относительно недавних исследованиях [3, 4] указывается на некоторые их конструктивные недостатки, ограничивающие возможности повышения единичной мощности энергоблока и параметров генерируемого пара. В первую очередь, это связано с малыми высотой и объемом парового пространства над зеркалом испарения, что снижает сепарационные возможности и мощность парогенератора в целом. Также отмечается, что вариант размещения горизонтальных ПГ внутри реакторной установки проигрывает по компактности варианту с вертикальными ПГ и требует более громоздкой и дорогостоящей защитной оболочки.

Горизонтальный ПГ (рис. 1) представляет собой цилиндрический корпус, в котором горизонтально рядами расположены U-образные теплообменные трубки, соединенные с вертикальными коллекторами для подвода (горячий коллектор) и отвода (холодный коллектор) теплоносителя I контура [5]. Теплоноситель из реактора поступает в ПГ через горячий коллектор, проходит по горизонтальным теплообменным трубам и выходит через холодный коллектор, передавая свое тепло воде II контура через стенки теплообменной поверхности. Из-за неравномерного тепло-

выделения в теплообменных трубах и асимметричного расположения внутрикорпусных устройств во II контуре парогенератора циркуляция рабочего тела имеет сложный трехмерный характер.

Недогретая до температуры кипения питательная вода подается над трубными пучками, нагревается при взаимодействии с насыщенным паром, течет вниз по коридорам, а затем, поднимаясь вверх сквозь пучки труб, закипает и превращается в пар. В паровом объеме используется одноступенчатая схема осадительной (гравитационной) сепарации влажного пара. В верхней части парового объема установлен пароприемный потолочный дырчатый щит. Пар отводится из парогенератора через пароводящие трубы, присоединенные к верхней части корпуса.

В горизонтальном ПГ паровая нагрузка на выходе из пучков труб распределяется неравномерно по его горизонтальному поперечному сечению. Она наибольшая в зоне горячего коллектора (горячая сторона) вследствие более высокой температуры теплоносителя I контура, а в зоне холодного коллектора (холодная сторона) – самая низкая. Для выравнивания паровой нагрузки в горизонтальных ПГ устанавливают погруженный дырчатый лист. Это устройство, обладающее высоким коэффициентом гидравлического сопротивления, позволяет выравнивать существенно неравномерные по пространству пароводящие потоки. По краям дырчатого листа установлена закраина, предназначенная для обеспечения естественной циркуляции пароводящей смеси. Погруженный дырчатый лист с закраиной закрывает сверху трубный пучок как колпак, зазор между внешней поверхностью закраины и стенкой корпуса играет роль сливного канала, через который избыток воды с горизонтальной пластины листа поступает в нижнюю часть трубного пучка.

Наиболее распространенный на сегодняшний день тип горизонтального парогенератора ПГВ-1000 предназначен для эксплуатации на АЭС с ВВЭР-1000. Следует отметить, что с начала эксплуатации (1980 г.) парогенераторы ПГВ-1000 были существенно модернизированы, при этом были сохранены их наименование и основная концепция [5]. Потребность в их модернизации была обусловлена исключительной сложностью теплогидравлических процессов, которая не позволяла заранее, на стадии проектирования, принять наиболее оптимальные решения. На основе результатов исследований на натуральных парогенераторах и экспериментальных моделях при проектировании парогенераторов ПГВ-1000 были предусмотрены следующие мероприятия:

установка отбойных козырьков в верхней части корпуса ПГ в районе горячего коллектора для устранения локального прорыва пара в целях пе-

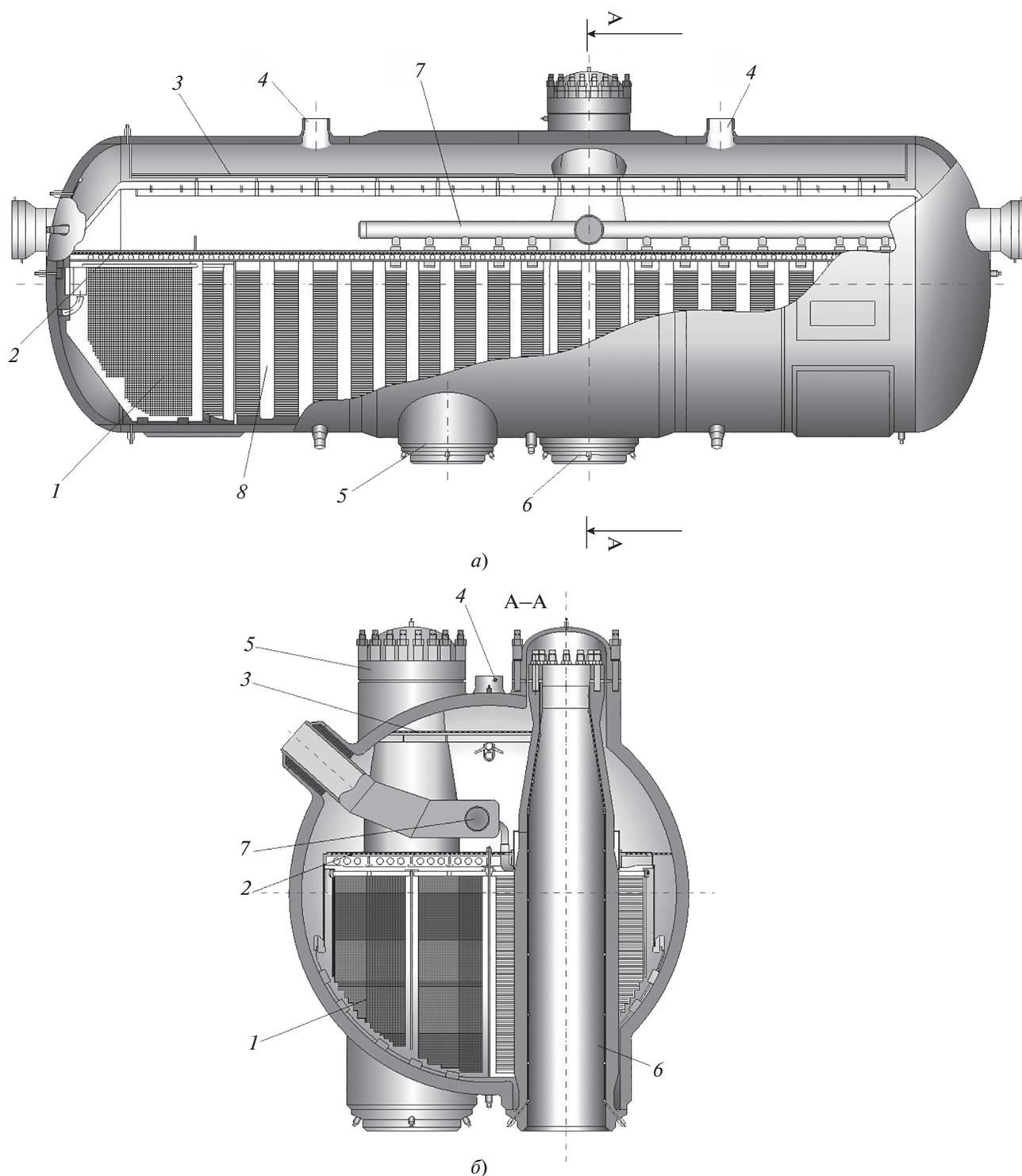


Рис. 1. Вид сбоку (а) и поперечное сечение (б) горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР.

1 – пучок теплообменных труб; 2 – ПДЛ; 3 – пароприемный потолочный дырчатый щит; 4 – паротводные трубы; 5–7 – холодный, горячий и питательный коллекторы; 8 – дистанционирующая решетка

ревода вертикальной составляющей скорости потока в горизонтальную и ее замедления;

перекрытие опускающего канала циркуляции в теплообменном пучке на горячей стороне для

предотвращения прорыва и выброса пароводяной смеси у корпуса;

увеличение перфорации погруженного дырчатого листа до 8% для улучшения гидродинамики

водяного объема благодаря уменьшению гидравлического сопротивления ПДЛ и оптимизации циркуляции потока;

изменение мест отбора среды на уравнивательные сосуды для измерения уровня с целью повысить стабильность и однозначность получаемых значений;

организация «солевого» отсека и изменение в системе раздачи питательной воды и продувки (а также отбора проб) для снижения содержания примесей в районах коллекторов максимальной тепловой напряженности;

оптимизация и реконструкция систем измерения уровня воды над дырчатым листом, водопитания и продувки;

исключение сепарирующих жалюзи и переход к гравитационной сепарации в паровом объеме парогенератора.

Из приведенного перечня модификаций следует, что для оптимизации внутрикорпусных устройств парогенератора необходимо знать гидродинамику двухфазных потоков в его объеме. Поэтому, естественно, возникла необходимость создать специальные расчетные коды, моделирующие гидродинамику двухфазных потоков в горизонтальном парогенераторе, которые позволили бы проводить оптимизационные расчеты для отработки различных конструктивных решений. Разработка подобных кодов началась в конце 1990-х годов, и к настоящему времени для анализа теплогидравлических процессов, протекающих в объеме горизонтального ПГ, созданы специализированные коды [6–9], а также используются CFD-коды общего назначения [10, 11]. Код STEG, разрабатываемый на кафедре АЭС НИУ МЭИ, является одним из наиболее валидированных на опытных данных, полученных на экспериментальных установках и натуральных парогенераторах [12–17].

В настоящей работе выполнена валидация кода STEG на экспериментах [18–20], в которых на водовоздушной модели ПГ изучали гидродинамику двухфазной среды в свободно погруженных пучках труб.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Во Всероссийском теплотехническом институте была сооружена водовоздушная модель парогенератора, на которой изучали движение двухфазной среды в условиях, характерных для натурального ПГ [18–20]. Модель включала в себя пучок труб, расположенных в шахматном порядке, погруженный дырчатый лист и опускной канал (рис. 2). Трубный пучок состоял из 57 рядов труб диаметром 16.0×1.4 мм и длиной 0.5 м, изготовленных из стали X18H10T. В каждом ряду бы-

ло установлено 10/11 труб (разное количество труб в соседних рядах связано с их чередованием вследствие расположения в шахматном порядке). Геометрические характеристики и система дистанционирования трубного пучка в модели были такими же, как и в натурном ПГВ-1000. Трубный пучок был плотно огорожен листами из органического стекла по всей высоте для предотвращения выхода из него двухфазной среды и создания таким образом контура естественной циркуляции. Для того чтобы соблюсти соотношение площадей ПДЛ и опускных каналов такое же, как в натурном ПГВ-1000, был установлен вытеснитель.

Расстояние от дырчатого листа до трубного пучка составляло 0.25 м, использовались четыре листа с перфорацией 7.5 и 20.0%. Корпус модели имел остекление со всех сторон, что позволяло визуально контролировать процессы, происходящие внутри модели. Приведенную скорость воздуха к зеркалу испарения в модели можно было изменять от 0 до 1.5 м/с.

Движение среды в модели происходило за счет естественной циркуляции, которая обеспечивалась путем подачи воздуха в трубный пучок. Подвод воздуха осуществлялся в трех сечениях по высоте пучка труб через все 10 труб (перфорированных), находящихся в данном сечении. При этом моделировался процесс парообразования. Расход воздуха, подаваемого в каждое сечение, мог изменяться в зависимости от программы исследования. Измерение объемного газосодержания проводилось методом γ -просвечивания. Помимо этого, измеряли перепады давления по высоте трубного пучка и уровни воды в модели и над ПДЛ.

Каждый эксперимент выполняли при заданных нагрузке воздуха на зеркало испарения и уровне воды в модели. Особое внимание уделяли обоснованию правомерности водовоздушного моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном ПГ, протекающих в насыщенной пароводяной среде при давлении 7 МПа. Было показано, что при моделировании процессов естественной циркуляции на водовоздушных моделях в свободно погруженных трубных пучках обеспечиваются удовлетворительные результаты при переносе их на пароводяные модели, если в качестве основного условия при этом принимается равенство приведенных скоростей воздуха и пара. При сопоставлении экспериментального воздухоудержания при движении двухфазной среды в свободных каналах с паросодержанием, измеренным в промышленных условиях на реальных парогенераторах, была доказана возможность моделирования этих процессов на водовоздушных стендах.

Также следует отметить, что в данной работе авторов не интересует точность непосредственного переноса экспериментальных данных на на-

турные условия горизонтального ПГ, поскольку основной целью является валидация кода STEG на опытных данных, полученных на водовоздушной модели. При этом в расчетах используются значения теплофизических параметров для воды и воздуха при атмосферном давлении и комнатной температуре, что соответствует экспериментальным условиям. Таким образом, результаты проведенной валидации на водовоздушной модели дополняют полученные ранее данные о сравнении результатов расчетов и экспериментов для условий натурального ПГ, расширяют область исследованных параметров и, тем самым, укрепляют доверие к возможностям кода STEG моделировать реальные процессы течения двухфазной пароводяной смеси в натурном парогенераторе.

ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОДА STEG-M

Математическая модель кода STEG основана на двухскоростной двухтемпературной модели двухфазного потока [21]. Каждая фаза (жидкость и пар/газ) рассматривается как отдельная непрерывная среда, для которой формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии. Для описания взаимодействия одной фазы с другой и с окружающими конструкциями (стенка, трубный пучок и т.п.) уравнения сохранения дополняются специальными членами, моделирующими эти взаимодействия. Поскольку рассматриваемые в данной статье экспериментальные исследования проводили при комнатной температуре (теплообмен между водой и воздухом отсутствовал), то для краткости уравнения сохранения энергии не приводятся.

Далее представлены следующие уравнения сохранения:

массы жидкости

$$\frac{\partial \alpha_f \rho_f}{\partial t} + \text{div}(\alpha_f \rho_f \vec{V}_f) = 0;$$

массы газа

$$\frac{\partial \alpha_g \rho_g}{\partial t} + \text{div}(\alpha_g \rho_g \vec{V}_g) = M_{s,g};$$

импульса жидкости

$$\alpha_f \rho_f \left(\frac{\partial \vec{V}_f}{\partial t} + \vec{V}_f \nabla \vec{V}_f \right) = -\alpha_f \nabla p + \vec{F}_{fg} - \vec{F}_{TBf} + \alpha_f \rho_f \vec{g};$$

импульса газа

$$\alpha_g \rho_g \left(\frac{\partial \vec{V}_g}{\partial t} + \vec{V}_g \nabla \vec{V}_g \right) = -\alpha_g \nabla p - \vec{F}_{fg} - \vec{F}_{TBg} - \vec{F}_{SPSg} + \alpha_g \rho_g \vec{g} + M_{s,g} (\vec{V}_{s,g} - \vec{V}_g);$$

объема

$$\alpha_f + \alpha_g + \alpha_{tub} = 1,$$

где индексы f, g обозначают жидкость и газ соответственно; α – объемная доля; ρ – плотность; \vec{V} – скорость; p – давление; $M_{s,g}$ – массовый источник газа; \vec{F}_{fg} – сила межфазного взаимодействия; $\vec{F}_{TBf}, \vec{F}_{TBg}$ – сила сопротивления трубного пучка для жидкости и газа соответственно; \vec{F}_{SPSg} – сила сопротивления погруженного дырчатого листа для газа; $\vec{V}_{s,g}$ – скорость газа, подаваемого из источника; \vec{g} – ускорение свободного падения; α_{tub} – объемная доля трубного пучка.

Модели межфазного сопротивления, гидравлических сопротивлений трубного пучка и погруженного дырчатого листа подробно рассмотрены в [14, 17]. Далее приведены лишь краткие сведения об этих моделях.

Межфазное сопротивление. Выражение для силы межфазного сопротивления \vec{F}_{fd} имеет следующий вид:

$$\vec{F}_{fd} = 0.75 \frac{C_D}{D_p} \rho_c \alpha_d \vec{V}_r |\vec{V}_r|,$$

где C_D – коэффициент сопротивления; D_p – диаметр пузырька/капли; ρ_c – плотность непрерывной фазы; α_d – объемная доля дисперсной фазы; $\vec{V}_r = \vec{V}_d - \vec{V}_c$ – относительная скорость; \vec{V}_d, \vec{V}_c – скорость дисперсной и непрерывной фазы.

С помощью экспериментальных наблюдений выявлены следующие характерные зоны течения пароводяной смеси в горизонтальном ПГ:

- трубный пучок;
- свободные пространства в нижней части ПГ;
- пространство от верхней части трубного пучка до погруженного дырчатого листа;
- барботажный слой над ПДЛ и паровое пространство.

В табл. 1 представлена карта режимов течения двухфазного потока в различных зонах ПГ.

Для течения двухфазного потока в трубном пучке используется формула для расчета межфазного сопротивления [22], полученная в результате анализа экспериментальных данных по течению двухфазной среды сквозь трубный пучок. В областях, не занятых трубным пучком, в [14] предложена модель межфазного сопротивления, основанная на подходе Ишии – Зубера [23], но имеющая несколько отличий, связанных с течением двухфазной смеси в горизонтальном ПГ. Эта модель имеет следующие особенности.

Для описания пузырькового и пузырьково-снарядного режимов применяется двухгрупповая схема пузырькового течения: мелкие пузырьки

Таблица 1. Режимы течения в зонах парогенератора

Зона	Режим			
	пузырьковый	пузырьково-снарядный	эмульсионный	дисперсный
Трубный пучок	+	–	+	–
Свободные зоны в нижней части ПГ (коридоры и т.п.)	+	+	–	–
Зона между верхней границей ТП и ПДЛ	–	+	+	+
Зона над ПДЛ	–	+	–	+

Примечание. “Плюс” – присутствует; “минус” – отсутствует.

сферической и слегка деформированной формы и более крупные пузыри, имеющие форму сферического сегмента. В качестве критерия отнесения пузырька к той или иной группе используется значение диаметра Саутера, равное $4 La$, где La – число Лапласа [$La = \sqrt{\sigma / (g\Delta\rho)}$ (здесь σ – поверхностное натяжение)].

Эмульсионный режим реализуется между трубным пучком и ПДЛ в диапазоне значений паросодержания 0.5–0.7. Коэффициент сопротивления вычисляются по формуле Ишии – Зубера [23].

Дисперсный режим течения возникает в результате выхода пара с поверхности раздела фаз с захватом и выносом вверх капель воды. Диаметр капель рассчитывают по эмпирической зависимости А.Г. Агеева [24]. Значение объемного паросодержания, при котором происходит переход к дисперсному режиму, было установлено при наилучшем совпадении результатов расчетов с экспериментальными данными.

Сопротивление трубного пучка. Перепад давления двухфазного потока на трубном пучке $\Delta p_{2\phi}$ в направлении координатной оси e ($e = x, y, z$) традиционно определяется как

$$\Delta p_{2\phi} = \xi_0 \frac{G^2}{2\rho_f} \left[1 + X \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right] \Psi,$$

где ξ_0 – коэффициент сопротивления для однофазного потока в направлении e ; G – массовая скорость в направлении e ; Ψ – коэффициент неомогенности двухфазного потока; X – массовое паросодержание.

Для расчета Ψ используют формулы, полученные при обработке экспериментальных данных [20]. В связи с громоздкостью этих формул они в статье не приводятся.

Соответствующая сила сопротивления трубного пучка двухфазному потоку $F_{2\phi}$ в направлении e определяется следующим образом:

$$F_{2\phi} = (1 - \alpha_{tub}) \frac{\Delta p_{2\phi}}{\Delta e},$$

где Δe – ширина расчетной ячейки в направлении e .

Для применения этого соотношения в двухфазной модели необходимо разделить общий перепад давления на отдельные составляющие для каждой фазы. Сила сопротивления двухфазному потоку со стороны трубного пучка представляется в виде суммы сил, действующих на каждую фазу:

$$(1 - \alpha_{tub}) \frac{\Delta p_{2\phi}}{\Delta e} \equiv F_{2\phi} = F_f + F_g,$$

где F_f , F_g – сила сопротивления воды и газа с трубным пучком соответственно.

Если принять $R_F = \frac{F_f}{F_g}$, то можно получить следующие выражения:

$$F_f = \frac{R_F}{1 + R_F} F_{2\phi}; \quad F_g = \frac{1}{1 + R_F} F_{2\phi}.$$

Для вычисления R_F в [25] рекомендуется формула

$$R_F \equiv \frac{F_f}{F_g} = \frac{\xi_f \alpha_f \rho_f V_{f,\max}^2}{\xi_g \alpha_g \rho_g V_{g,\max}^2},$$

где ξ_f , ξ_g – коэффициент гидравлического сопротивления при однофазном течении в трубном пучке жидкой и газовой фазы соответственно.

Сопротивление ПДЛ. Для вычисления перепада давления на ПДЛ $\Delta p_{\text{ПДЛ}}$ используют следующее выражение:

$$\Delta p_{\text{ПДЛ}} = \Delta p_g \chi_{\text{ПДЛ}},$$

где

$$\Delta p_g = \xi_g \frac{\rho_g j_g^2 \text{ПДЛ}}{2}$$

– потери давления однофазного потока пара; ξ_g – потери давления однофазного потока пара, определяемые по [26]; ρ_g – плотность пара; $j_g \text{ПДЛ}$ – приве-

денная скорость пара на ПДЛ; $\chi_{\text{ПДЛ}}$ – множитель, учитывающий влияние двухфазности среды.

Это выражение означает, что за основу расчета перепада давления на ПДЛ берутся потери давления, вызванные течением пара, а дальнейшее уточнение производится с помощью множителя $\chi_{\text{ПДЛ}}$, который учитывает наличие жидкости в проходящем через ПДЛ течении. Множитель $\chi_{\text{ПДЛ}}$ зависит от формы отверстия, давления и состояния двухфазного потока перед ПДЛ. Для условий парогенератора ($p \approx 7$ МПа, в погруженном листе имеются отверстия диаметром 13 мм с острой кромкой, перфорация составляет 4–10%) в [27] при обработке экспериментальных данных была получена следующая формула для $\chi_{\text{ПДЛ}}$ в зависимости от паросодержания перед ПДЛ:

$$\chi_{\text{ПДЛ}} = 1.64 - 1.18\alpha_{\text{ПДЛ}},$$

где $\alpha_{\text{ПДЛ}}$ – паросодержание под ПДЛ.

В экспериментах, рассматриваемых в данной работе, значения перфорации ПДЛ (7.5–20.0%) несколько выходят за диапазон, в котором была ранее обоснована указанная формула для $\chi_{\text{ПДЛ}}$. Тем не менее, представляется разумным применить ее для анализа данных экспериментов и по результатам валидации принять решение о правомерности ее использования в расширенном диапазоне перфорации погруженного листа.

НОДАЛИЗАЦИОННАЯ СХЕМА И СЕТОЧНАЯ СХОДИМОСТЬ

Применяемая в дальнейших расчетах нодализационная схема показана на рис. 3. Она была разработана с учетом всех геометрических особенностей экспериментальной модели. В продольном направлении (вдоль труб) модель была разбита на пять ячеек для того, чтобы учесть наличие вытеснителя и правильно описать площадь проходного сечения опускных каналов. В поперечном направлении использовали 14 ячеек, размер которых составлял 20–30 мм, в вертикальном направлении – 91 ячейку размером 25–75 мм.

Для исследования влияния количества ячеек на численное решение были дополнительно разработаны еще две нодализационные схемы. В обеих схемах по-прежнему в продольном направлении использовали 5 ячеек, но в поперечном и вертикальном направлениях в одном случае применили 7 и 46 ячеек соответственно, а в другом случае – 28 и 182 ячейки соответственно. На рис. 4 показано, как меняется расчетное значение воздухосодержания на выходе из трубного пучка Φ_{49} в трех различных опытах. Максимальное различие в значениях, полученных по нодализационным схемам “7 × 46” и “14 × 91”, составляет 0.026, по нодализационным схемам “14 × 91” и “28 × 182” – 0.005. При этом максимальное различие между схемой “28 × 182” и экспериментом составляет 0.015.

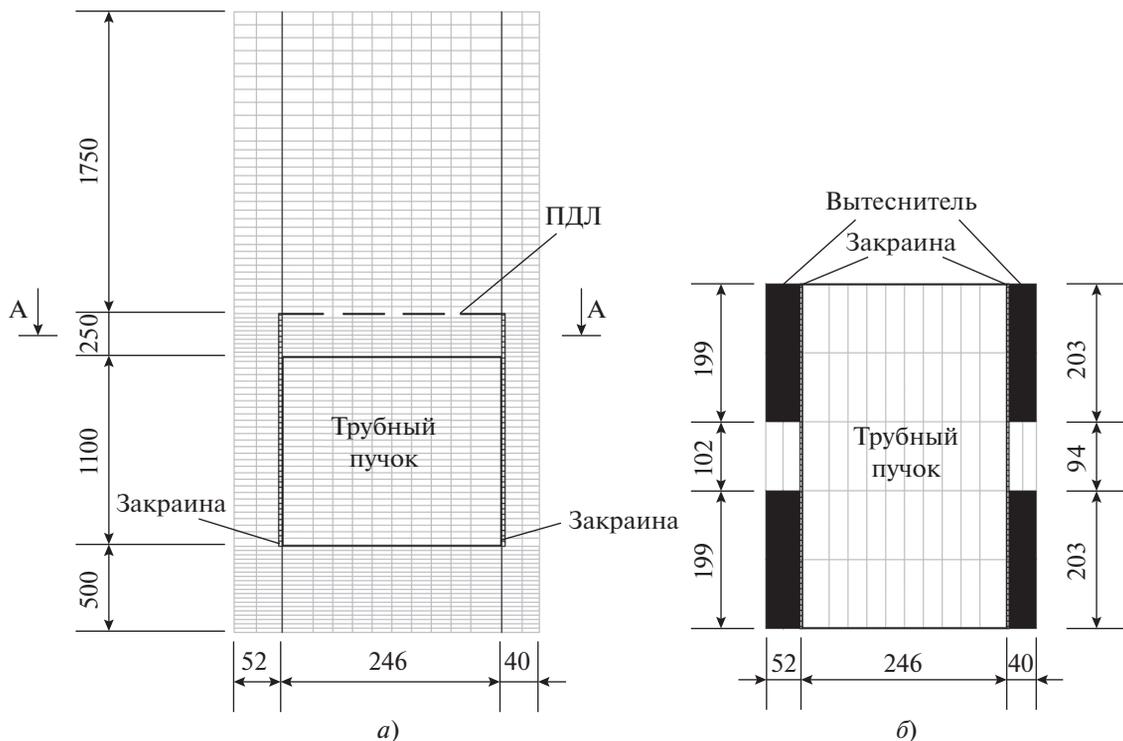


Рис. 3. Нодализационная схема

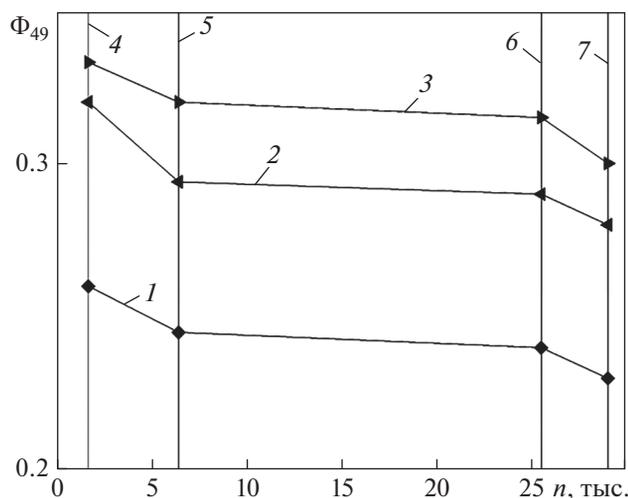


Рис. 4. Зависимость объемного воздухоудержания Φ_{49} от количества ячеек n в трех экспериментах (1–3). Нодализационная схема: 4 – “7 × 46”; 5 – “14 × 91”; 6 – “28 × 182”; 7 – данные эксперимента

Видно, что разница в результатах, полученных по нодализационным схемам “14 × 91” и “28 × 182”, невелика, поэтому в дальнейших расчетах использовали нодализационную схему “14 × 91”.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Были рассмотрены девять различных экспериментальных режимов, в шести из которых применяли погруженный лист с перфорацией 7.5%, в трех – с перфорацией 20%. Каждый режим характеризовался тремя приведенными скоростями подачи воздуха в нижнем w_{01}'' , среднем w_{02}'' , верхнем w_{03}'' сечениях и массовым уровнем воды в сосуде H_1 (табл. 2). Приведенные скорости подачи воздуха определяли как отношение расхода воздуха к площади проходного сечения над ПДЛ.

Таблица 2. Параметры экспериментальных режимов

Номер режима	ПДЛ, %	w_{01}'' , м/с	w_{02}'' , м/с	w_{03}'' , м/с	H_1 , м
1	7.5	0.08	0.08	0.08	1.6
2	7.5	0.15	0.15	0.15	1.6
3	7.5	0.25	0.25	0.25	1.6
4	7.5	0.28	0.43	0.57	1.5
5	7.5	0.51	0.75	0.99	1.5
6	7.5	0.59	0.84	1.11	1.6
7	20	0.28	0.28	0.28	1.5
8	20	0.25	0.40	0.55	1.5
9	20	0.51	0.75	1.00	0.8

На рис. 5 показана характерная картина циркуляции водовоздушной смеси в сосуде. Во всех рассчитанных режимах общие закономерности движения качественно схожи, а именно воздух движется сквозь трубный пучок вверх, проходит через ПДЛ и в верхней части модели отводится из сосуда. Вода выносится потоком воздуха над ПДЛ, где формируется двухфазный водовоздушный слой. Воздух, проникая сквозь воду, уносится вверх, большая масса воды зависает над ПДЛ, мелкие капли воды уносятся вместе с воздухом, а часть воды сливается вниз в зазоры между закраинами и стенками корпуса, затем поступает в нижнюю часть трубного пучка, откуда опять увлекается потоком воздуха вверх.

Количественное сравнение расчетных и экспериментальных данных включало в себя следующие параметры:

объемное воздухоудержание в трех точках (Φ_{49} , Φ_{51} и Φ_{53}), расположенных между трубным пучком и ПДЛ;

три перепада давления (Δp_1 , Δp_2 и Δp_3) по высоте трубного пучка;

уровень воды над ПДЛ (H_3).

На рис. 6 показаны распределения объемного воздухоудержания между трубным пучком и погруженным дырчатым листом с перфорацией 7.5% при различных значениях приведенных скоростей воздуха для экспериментов № 2, 4, 6. Хорошо видно, что по мере повышения нагрузки на зеркале испарения (расхода воздуха) воздухоудержание заметно увеличивается. Совпадение расчетных и экспериментальных данных довольно хорошее, особенно при малых расходах воздуха (эксперимент № 2).

Распределение объемного воздухоудержания в экспериментах с перфорацией листа 7.5% (эксперимент № 5) и 20% (эксперимент № 8) при схожих приведенных скоростях воздуха показано на рис. 7. Уменьшение степени перфорации погруженного листа приводит к возрастанию его гид-

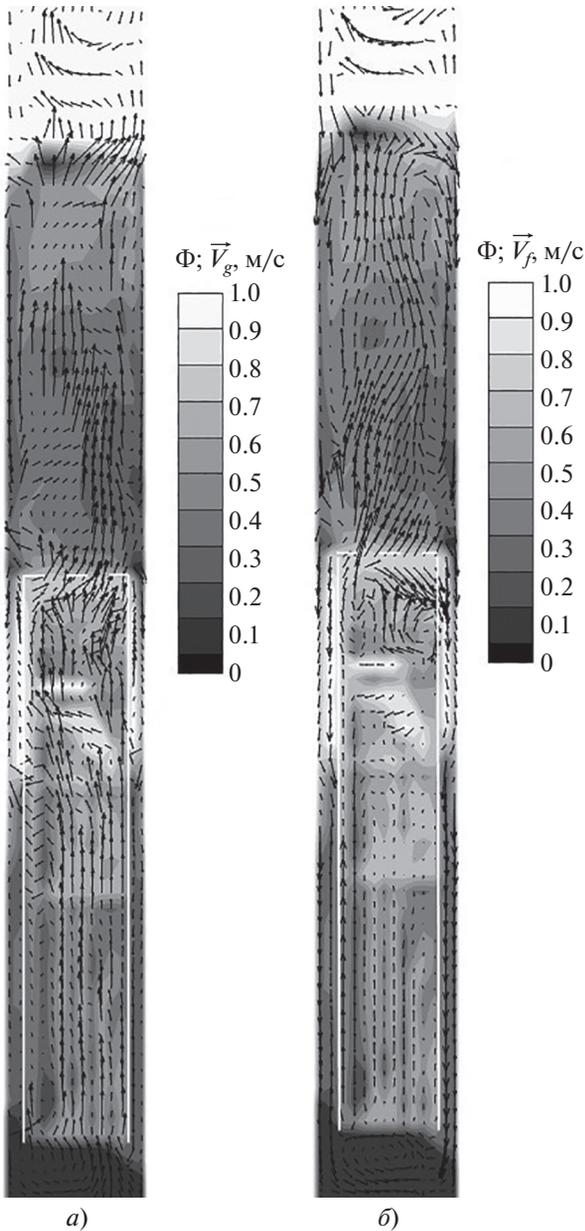


Рис. 5. Распределение объемного воздухоудержания Φ и скорости воздуха \vec{V}_g (а) и воды \vec{V}_f (б) для режима № 5 (см. табл. 2). Скорости изображены в виде векторов, воздухоудержание – в виде черно-белой палитры (воздух – светлый, вода – темная)

равлического сопротивления. В результате под ПДЛ скапливается больше пара (эксперимент № 5), т.е. формируется паровая подушка. Под листом со степенью перфорации 20% присутствует значительно меньше пара.

Увеличение степени перфорации погруженно-го листа способствует выносу на него большего количества воды. Это приводит к более интенсивной циркуляции воды сквозь трубный пучок (рас-

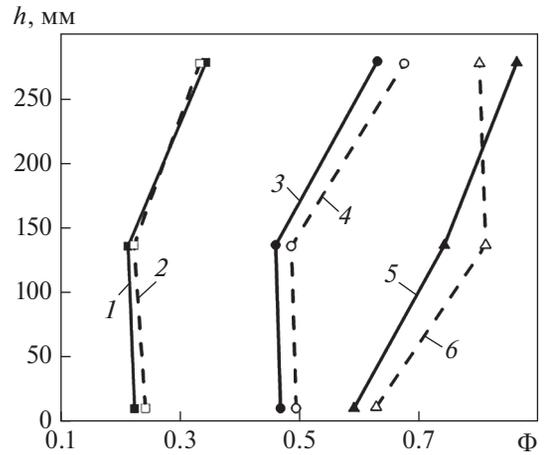


Рис. 6. Распределение объемного воздухоудержания по высоте h между трубным пучком и ПДЛ в экспериментах № 2 (1, 2), 4 (3, 4), 6 (5, 6) (см. табл. 2). Данные: эксперимента – 1, 3, 5; расчета – 2, 4, 6

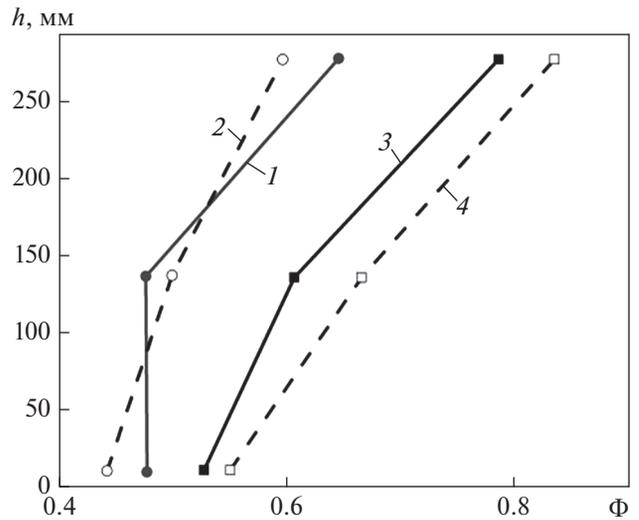


Рис. 7. Распределение объемного воздухоудержания между трубным пучком и ПДЛ в экспериментах № 5 (1, 2) и 8 (3, 4). Данные: эксперимента – 1, 3; расчета – 2, 4

ход пара постоянный и не зависит от степени перфорации листа), что вызывает повышение его гидравлического сопротивления. На рис. 8 показана потеря давления в трубном пучке $\Delta p_{ТП}$ в экспериментах № 5 (перфорация 7.5%) и № 9 (перфорация 20%), в которых поддерживались весьма близкие приведенные скорости подаваемого в модель воздуха. Хорошо видно увеличение потерь давления в эксперименте № 9 по сравнению с экспериментом № 5.

На рис. 9 представлены результаты расчетов уровня воды над ПДЛ, объемного воздухоудержания

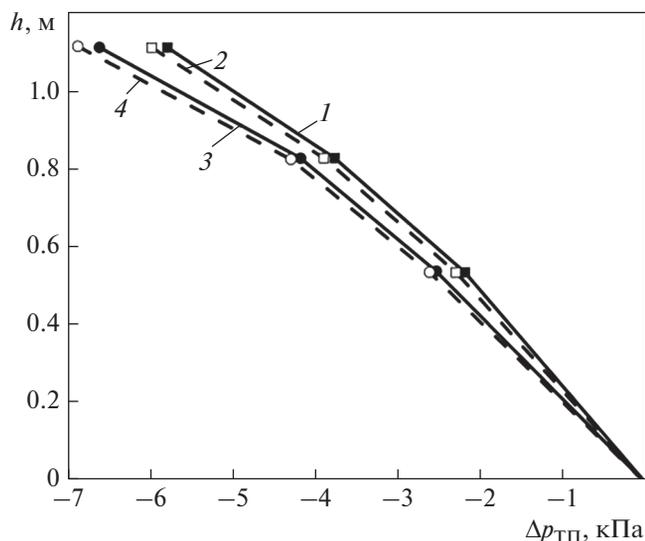


Рис. 8. Потери давления в трубном пучке $\Delta p_{\text{ТП}}$ в экспериментах № 5 (1, 2) и 9 (3, 4). Данные: эксперимента – 1, 3; расчета – 2, 4; $h = 0$ – нижний ряд труб

ния и потерь давления в трубном пучке и экспериментальные данные для всех девяти режимов. Пунктирные линии отражают относительную погрешность $\pm 10\%$ между расчетными и экспериментальными значениями.

Значения, полученные в расчетах с помощью кода STEG, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Относительные погрешности расчета для всех девяти экспериментальных режимов не превышают 10%. Также следует отметить, что результаты успешной валидации свидетельствуют о правомерности применения формулы для двухфазного множителя $\chi_{\text{ПДЛ}}$, которую использовали для определения перепада давления на ПДЛ, в расширенном диапазоне значений перфорации погруженного листа вплоть до 20%.

ВЫВОДЫ

1. При проведении расчетов с помощью кода STEG установлена картина циркуляции водовоздушной смеси в экспериментальной модели горизонтального парогенератора: воздух движется сквозь трубный пучок вверх, проходит через погруженный дырчатый лист и в верхней части модели отводится из сосуда. Вода выносится потоком воздуха над погруженным дырчатым листом, где формируется двухфазный водовоздушный слой. Воздух, проникая сквозь воду, уносится вверх, большая масса воды зависит над погруженным дырчатым листом, мелкие капли воды уносятся вместе с воздухом, а часть воды сливается вниз в зазоры между закраинами и стенками корпуса, затем поступает в нижнюю часть труб-

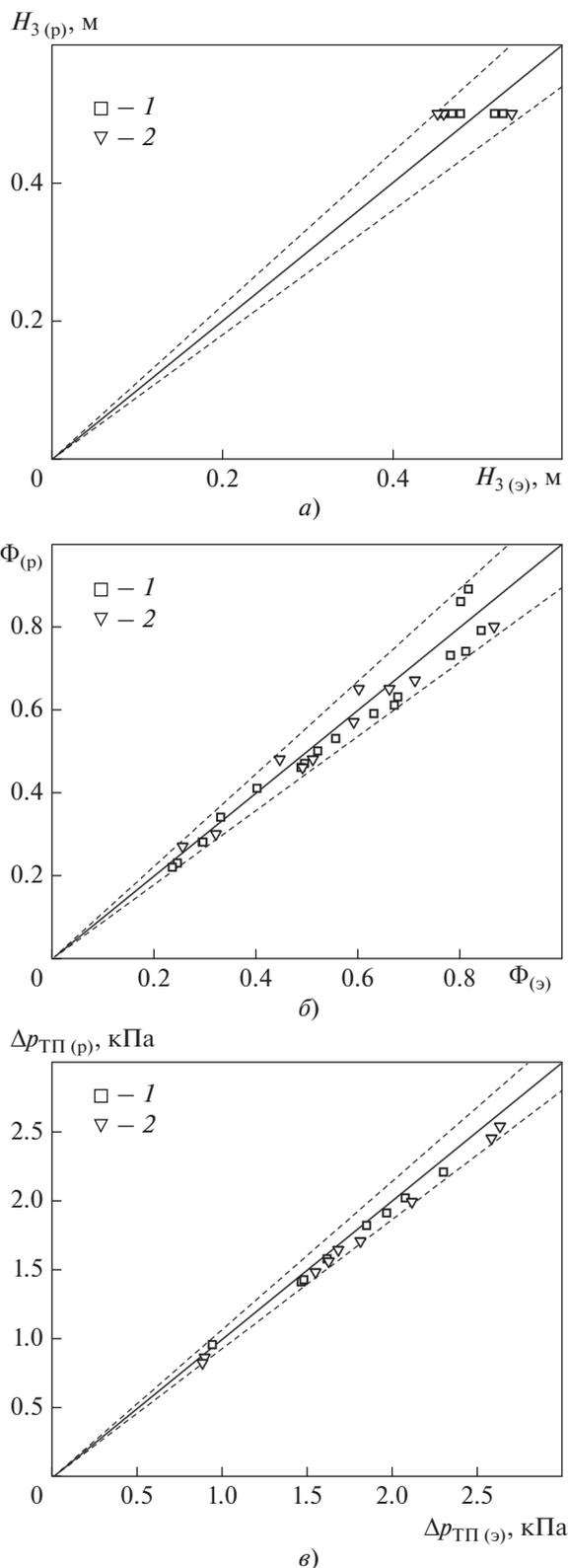


Рис. 9. Экспериментальные (э) и расчетные (р) данные по уровню воды над ПДЛ (а), объемному воздухо содержанию (б), потерям давления в трубном пучке (в) при перфорации погруженного листа 7.5% (1) и 20.0% (2)

ного пучка, откуда опять увлекается потоком воздуха вверх.

2. Количественное сравнение результатов расчетов с помощью кода STEG и экспериментальных данных, полученных на водовоздушной модели, свидетельствует об их хорошем совпадении – относительные погрешности расчета объемной доли воздуха и перепадов давления не превышают 10%.

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. **Парогенераторы** – горизонтальные или вертикальные (каким быть парогенератору АЭС с ВВЭР?) / Н.Б. Трунов, Б.И. Лукасевич, Д.О. Веселов, Ю.Г. Драгунов // Атомная энергия. 2008. Т. 105. Вып. 3. С. 127–135.
3. **Егоров М.Ю.** Вертикальные парогенераторы для АЭС с ВВЭР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 88–99.
4. **Russian and foreign steam generators for NPP power units with wet steam turbines** / М. Egorov, I. Kasatkin, I. Kovalenko, I. Krectunova, N. Lavrovskaya, N. Litvinova // E3S Web Conf. 2020. V. 178. P. 01007.
5. **Парогенераторы** реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б.И. Лукасевич, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов, С.Е. Давиденко. М.: Академкнига, 2004.
6. **Stevanovic V.D., Stosic Z.V., Kiera M.** Horizontal steam generator thermal-hydraulics at various steady state power levels // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Nuclear Engineering – ICONE10. Arlington, VA, USA, 14–18 April 2002. ICONE10-22451. <https://doi.org/10.1115/ICONE10-22451>
7. **Мелихов О.И., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В.** Математическое моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе с помощью кода STEG // Новое в российской электроэнергетике. 2008. № 8. С. 21–33.
8. **Крошили А.Е., Крошили В.Е., Смирнов А.В.** Численное исследование трехмерных течений пароводяной смеси в корпусе парогенератора ПГВ-1000 // Теплоэнергетика. 2008. № 5. С. 12–19.
9. **Hovi V., Iivonen M.** PORFLO simulations of Loviisa horizontal steam generator: Research Report. VTT Technical Research Centre of Finland, 2010. No. VTT-R-01406-10.
10. **Rabiee A., Kamalinia A.H., Haddad K.** Horizontal steam generator thermal hydraulic simulation in typical steady and transient conditions // Nucl. Eng. Des. 2016. V. 305. P. 465–475. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.06.004>
11. **Rabiee A., Kamalinia A.H., Haddad K.** Two-phase flow field simulation of horizontal steam generators // Nucl. Eng. Technol. 2017. V. 49. No. 1. P. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.08.008>
12. **Validation of the STEG code using PGV experiments on hydrodynamics of horizontal steam generator** / T.T. Le, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, A.A. Nerovnov, S.M. Nikonov // Nucl. Eng. Des. 2020. V. 356. P. 110380. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110380>
13. **Investigation of the equalization capability of submerged perforated sheets under thermal-hydraulic conditions of a horizontal steam generator** / T.T. Le, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov, V.N. Blinkov, A.A. Nerovnov, S.M. Nikonov // Ann. Nucl. Energy. 2020. V. 148. P. 107715. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107715>
14. **Le T.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I.** Recommended set of interfacial drag correlations for the two-phase flow under thermal–hydraulic conditions of a horizontal steam generator // Nucl. Eng. Des. 2021. V. 379. P. 111249. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111249>
15. **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>
16. **Validation of the STEG code using experiments on two-phase flow across horizontal tube bundles** / S. Liu, F. Yin, V.I. Melikhov, O.I. Melikhov // Nucl. Eng. Des. 2022. V. 399. P. 112048. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4135351>
17. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ле Т.Т.** Экспериментально-расчетные исследования гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе. М.: Наука, 2022.
18. **Колбасников А.В., Шварц А.Л., Галецкий Н.С.** Исследование гидродинамики пароводяной среды в межтрубном пространстве поверхностей нагрева с целью усовершенствования парогенераторов АЭС с ВВЭР // Электрические станции. 1991. № 8. С. 44–48.
19. **Колбасников А.В., Шварц А.Л., Галецкий Н.С.** Исследование гидродинамики двухфазной среды в свободно погруженных поверхностях нагрева применительно к парогенераторам АЭС // Теплоэнергетика. 1992. № 4. С. 62–66.
20. **Колбасников А.В.** Разработка методов расчета гидродинамики двухфазной среды и теплообмена в поперечно омываемых поверхностях нагрева парогенераторов на основе экспериментальных исследований: дис. ... канд. техн. наук. М.: ОАО ВТИ, 2000.
21. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
22. **Simovic Z.R., Ocoolkjic S., Stefanovic V.D.** Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles // Int. J. Multiphase Flow. 2007. V. 33. No. 2. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.08.003>
23. **Ishii M., Zuber N.** Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows // AIChE J. 1979. V. 25. No. 5. P. 843–855. <https://doi.org/10.1002/aic.690250513>

24. **Агеев А.Г., Белов В.И., Васильева Р.В.** Экспериментальное и аналитическое исследование предельных нагрузок при гравитационной сепарации // Теплогидродинамические процессы в элементах энергооборудования электростанций: сб. науч. тр. ЭНИН. М., 1988. С. 41–51.
25. **RELAP5/Mod3.3.** Code Manual. Models and Correlations. NUREG/CR-5535. V. IV. 2001.
26. **Идельчик И.Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992.
27. **Влияние** объемного паросодержания на гидравлическое сопротивление погруженного дырчатого листа / В.Н. Блинков, И.В. Елкин, Д.А. Емельянов, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, А.А. Неровнов, С.М. Никонов, Ю.В. Парфенов // Теплоэнергетика. 2015. № 7. С. 24–29.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615070012>

Validation of the STEG Code against Experiments on Hydrodynamics of a Horizontal Steam Generator

Kh. Abdi^a, N. Uregani Dzhafari^a, V. I. Melikhov^{a, b, *,} and O. I. Melikhov^{a, b}

^a *National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia*

^b *Electrogorsk Research and Development Center for Nuclear Power Plants Safety, Electrogorsk, 142530 Russia*

^{*}*e-mail: MelikhovVI@mpei.ru*

Abstract—A numerical analysis of the experiments addressed to studies of hydrodynamic processes in a horizontal steam generator has been performed using the STEG (STEam Generator) code. The main components of the experimental model include a staggered tube bundle, a submerged perforated sheet (SPS) with baffles, and a downcomer. An air–water mixture was used as a two-phase fluid. The working fluid flow in the model was driven by natural circulation induced by air supply to the lower, middle, and upper sections of the tube bundle. The gas void fraction was measured by the γ -radiography method. In addition, pressure drops along the height of the tube bundle and water levels in the model and above SPS were also measured. Each experiment was performed at a prescribed air load on the evaporation surface and water level in the model. The STEG code was developed at the Department of Nuclear Power Plants of NRU MPEI to model thermohydraulic processes in a horizontal steam generator. The mathematical model is based on a two-fluid approach to the description of a two-phase flow using balance mass, momentum, and energy conservation equations and semiempirical closing correlations for interfacial interactions and interactions with various surrounding structures (tube bundle, walls, etc.). The STEG code was used to perform calculations for nine experimental regimes differing in the perforation ratio of the submerged perforated sheet and the supplied air flowrate. The qualitative regularities of the two-phase air–water mixture circulation in the model of a horizontal steam generator and the effect of experimental values of the main parameters on the circulation have been established. Quantitative results of comparison of the predictions with the experiment demonstrate their good agreement since the relative errors in the predicted air void fractions and pressure drops do not exceed 10%.

Keywords: horizontal steam generator, tube bundle, submerged perforated sheet, simulation, computational code, two-phase flow, hydraulic resistance, interfacial interaction, air–water fluid