

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ПАРОГЕНЕРАТОРЫ: СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (ОБЗОР)¹

© 2025 г. В. Н. Блинков^a, А. В. Дедов^b, И. В. Елкин^{c, d}, В. И. Мелихов^{b, c, *},
О. И. Мелихов^{b, c}, С. М. Никонов^{b, c}, А. С. Никулин^b

^aАО “Концерн Росэнергоатом”, Холодильный пер., д. 3а, Москва, 115191 Россия

^bНИИ “Московский энергетический институт”, Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

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

^dНИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: MelikhovVI@mpei.ru

Поступила в редакцию 08.09.2024 г.

После доработки 20.11.2024 г.

Принята к публикации 04.12.2024 г.

Выполнен обзор конструкций горизонтальных парогенераторов (ПГ) для атомных электростанций с водо-водяными реакторами и экспериментально-расчетных исследований теплогидравлических процессов, протекающих в них. Рассмотрены горизонтальные ПГ начиная с первой серийной конструкции ПГВ-440 и наиболее распространенного на сегодняшний день ПГВ-1000М и заканчивая парогенераторами, разработанными для реакторных установок нового поколения ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, а также для установки большой мощности ВВЭР-1500. Проведен сопоставительный анализ экспериментальных стендов, созданных для изучения теплогидравлических процессов, протекающих в горизонтальном парогенераторе. Каждый из трех рассмотренных стендов имеет ограничения по моделированию натурального ПГ, связанные либо с геометрическими характеристиками, либо с теплогидравлическими параметрами. Тем не менее, показано, что на сегодняшний день имеется достаточно обширная база опытных данных, пригодная для валидации расчетных кодов, моделирующих теплогидравлические характеристики горизонтального парогенератора. Представлен обзор существующих расчетных кодов и более подробно рассмотрен код STEG, основанный на использовании многофазных моделей для описания течения двухфазной среды. Валидация кода STEG на опытных данных по паросодержанию, перепадам давления и скоростям воды показала хорошую точность результатов расчетов. Одна из проблем, которую необходимо решить при проектировании горизонтальных парогенераторов для реакторных установок нового поколения, – повышение выравнивающей способности погруженного и пароприемного дырчатых листов вследствие усиления неравномерности паровой нагрузки на зеркале испарения и течения пара в паровом пространстве. Приведены результаты экспериментально-расчетных исследований выравнивающей способности дырчатых листов, которые подтверждают возможность ее повышения посредством применения переменной степени перфорации. Сформулированы направления дальнейших экспериментальных исследований теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе и пути совершенствования расчетных кодов.

Ключевые слова: горизонтальный парогенератор, теплогидравлические процессы, эксперимент, моделирование, расчетный код

DOI: 10.56304/S004036362570078X

Парогенераторы являются основным оборудованием атомных электростанций с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением. Конструкция

ПГ в значительной степени влияет на компоновку АЭС, ее безопасность и надежность. На сегодняшний день в атомной энергетике используются две принципиально отличающиеся одна от другой конструкции парогенераторов: горизонтальные, применяемые на АЭС с ВВЭР, и вертикальные, разработанные для атомных станций с реакторами западного типа PWR [1, 2]. Основное различие

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

между ними, как следует из их названия, состоит в использовании вертикального (либо горизонтального) цилиндрического корпуса и вертикально установленных (либо горизонтально) змеевиков поверхности теплообмена в вертикальном и горизонтальном ПГ соответственно. Следует отметить, что создание и развитие конструкции горизонтальных ПГ в СССР происходило в то время, когда в атомной энергетике западных стран уже был принят однозначный курс на использование вертикальных ПГ. Выбор советских специалистов горизонтальной конструкции ПГ основывался на анализе требуемых технико-экономических показателей, условий размещения оборудования, а также имевшегося опыта изготовления и эксплуатации теплообменного оборудования для нужд традиционной энергетике. Правильность сделанного выбора подтвердил сопоставительный анализ итогов многолетней эксплуатации горизонтальных и вертикальных ПГ [3, 4]. Основные преимущества горизонтальных ПГ перед вертикальными следующие:

на поверхностях вертикальных коллекторов в I контуре не происходит отложения нерастворимых примесей, соответственно уменьшается вероятность коррозионного повреждения теплообменных труб в местах соединения с коллекторами;

значительная площадь зеркала испарения обеспечивает меньшую паровую нагрузку, что позволяет использовать простую схему осадительной (гравитационной) сепарации;

благодаря низкой скорости движения пароводяной смеси в корпусе ПГ снижается риск возникновения вибраций теплообменных труб и повреждений от посторонних объектов.

Главный недостаток конструкции вертикального парогенератора – необходимость использования горизонтальной трубной доски для закрепления теплообменных труб. На верхней поверхности трубной доски скапливаются шламовые отложения, способствующие развитию коррозии труб в этой зоне. Для удаления шлама требуется периодическая химическая или механическая очистка. В горизонтальном ПГ подобные отложения образуются на нижней поверхности корпуса вне пучка теплообменных труб, откуда их легко можно убрать.

Тем не менее, сравнение конструкций горизонтального и вертикального ПГ продолжается. В работах [5, 6] указывается, что конструкция горизонтального ПГ имеет трудноустраняемые недостатки:

малые высота и объем парового пространства, снижающие потенциал гравитационной сепарации и мощность ПГ;

невозможность создания выделенного экономизерного участка.

При этом подчеркиваются и положительные особенности вертикальных ПГ:

отсутствие застойных зон в корпусе ПГ, а следовательно, и отложений в них;

равномерность тепловосприятости поверхности нагрева, обеспечивающая улучшение условий для сепарации влаги;

высокая степень осушки пароводяной смеси вследствие сочетания жалюзийных и центробежных сепараторов;

повышение температурного напора и параметров производимого пара.

Авторы [5, 6] делают вывод о перспективности внедрения вертикальных ПГ в российскую атомную энергетику.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

Конструкция горизонтального ПГ (рис. 1, 2) включает в себя следующие основные элементы: цилиндрический корпус, входной (“горячий”) коллектор, выходной (“холодный”) коллектор, горизонтальный пучок U-образных теплообменных труб, погруженный дырчатый лист (ПДЛ), пароприемный дырчатый лист (ППДЛ), коллектор питательной воды, дистанционирующие решетки [7]. Теплоноситель I контура, подогретый в активной зоне реактора, поступает в парогенератор через входной коллектор, далее течет по теплообменным трубам, отдавая тепло котловой воде, и затем покидает ПГ через выходной коллектор. Питательная вода температурой ниже температуры насыщения раздается над трубными пучками, нагрев питательной воды происходит вследствие конденсации пара на струях поступающей воды. Затем по коридорам питательная вода движется вниз, достигает днища, разворачивается и поднимается вверх сквозь трубные пучки, где закипает и превращается в пар. Таким образом, в объеме ПГ осуществляется естественная циркуляция воды: подъемное движение в пределах теплообменного пучка и опускное движение в вертикальных каналах (коридорах) между секциями теплообменного пучка.

Одноходовая схема движения теплоносителя в горизонтальном парогенераторе приводит к неравномерности тепловыделения поверхности нагрева и соответствующей неравномерности эпюры паровой нагрузки зеркала испарения. Паровая нагрузка наибольшая вблизи входного коллектора (“горячая” сторона) из-за более высокой температуры теплоносителя I контура, а в зоне выходного коллектора (“холодная” сторона) – наименьшая. Подача питательной воды на “горячую” сторону теплообменного пучка частично выравнивает паровую нагрузку, однако остаточная неравномерность остается значитель-

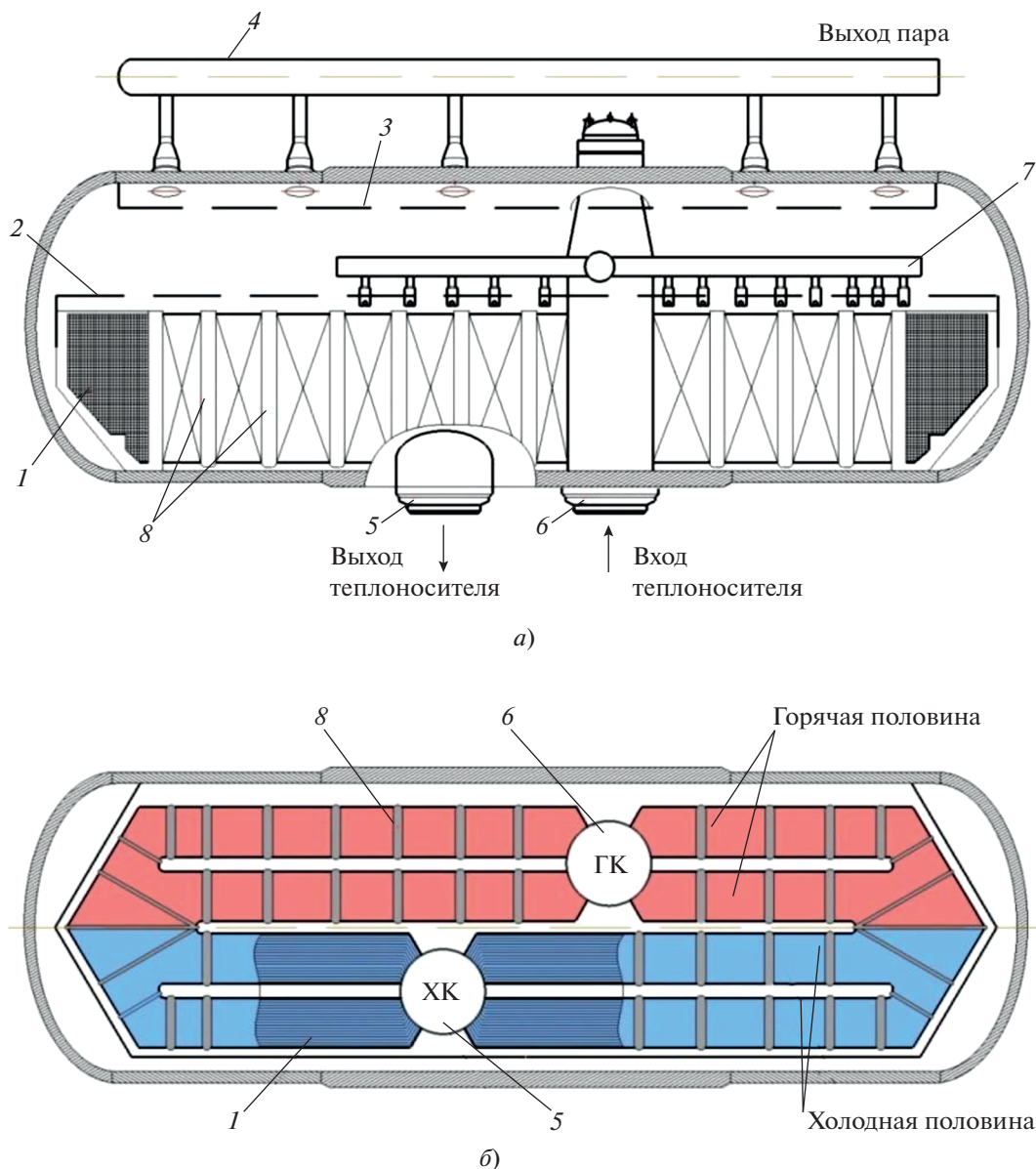


Рис. 1. Вид сбоку (а) и сверху (б) горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР.

1 – пучок теплообменных труб; 2 – ПДЛ; 3 – ППДЛ; 4 – паротводящие трубы; 5 – “холодный” коллектор; 6 – “горячий” коллектор; 7 – питательный коллектор; 8 – дистанционирующая решетка

ной. Выравнивание паровой нагрузки в горизонтальном парогенераторе осуществляется с помощью погруженного дырчатого листа. Особенностью конструктивного исполнения ПДЛ является наличие протяженной закраины, охватывающей трубный пучок в целях организации естественной циркуляции теплоносителя.

Высота парового объема над зеркалом испарения позволяет обеспечить требуемую влажность выходящего из ПГ пара с помощью гравитационной сепарации. Для выравнивания скоростей пара в паровом объеме и снижения тем самым его влажности в верхней части корпуса ПГ установ-

ливают пароприемный дырчатый лист. Пар покидает ПГ через паротводящие трубы.

В парогенераторе поддерживается требуемая влажность (сухость) пара благодаря заданному массовому уровню воды, который контролируется по сигналам от датчиков уравнильных сосудов, действие которых основано на принципе измерения столба воды гидростатическим методом.

Питательная вода подается в парогенераторы в количестве, соответствующем их паропроизводительности с учетом значений постоянной и периодической продувок. Следует отметить, что температура питательной воды в горизонтальных ПГ

Парогенератор ПГВ-440

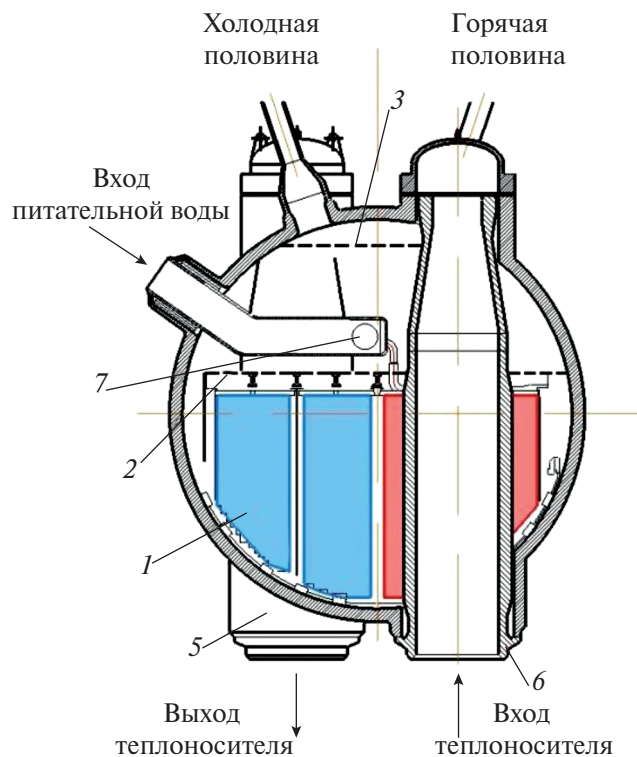


Рис. 2. Поперечное сечение горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР. Обозначения см. рис. 1

существенно ниже температуры насыщения, что является одной из причин неравномерности паровой нагрузки зеркала испарения, а также снижения паропроизводительности.

В табл. 1 приведены основные технические характеристики парогенераторов ПГВ-440, ПГВ-1000/1000 М, ПГВ-1000 МКП, ПГВ-1000 МКО и ПГВ-1500.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЭВОЛЮЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПГ

На сегодняшний день наибольший опыт накоплен при эксплуатации горизонтальных парогенераторов с водным теплоносителем ПГВ-440 и ПГВ-1000. Эти парогенераторы разрабатывались в 1960–1970-х годах для реакторных установок с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, которые были запущены в серийное производство в 1971 и 1980 гг. соответственно. Значительное количество этих энергоблоков эксплуатируются до сих пор. Следует отметить, что конструкции парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000 претерпели некоторые изменения, в частности были модифицированы раздаточный коллектор питательной воды, уравнивательные сосуды и ПДЖ, схемы сепарации, продувки и другие узлы.

Первый серийный парогенератор ПГВ-440, предназначенный для использования на АЭС с ВВЭР-440 (энергоблок № 3 Нововоронежской АЭС, 1971 г.), определил основные конструктивные особенности горизонтальных ПГ.

Корпус ПГ выполнен из углеродистой стали. В горловине корпуса имеется фланцевый разъем, через который осуществляется доступ к коллекторам греющего теплоносителя, изготовленным из нержавеющей стали. К коллекторам присоединен пучок U-образных теплообменных труб, установленных горизонтально. Трубный пучок (ТП) имеет коридорное расположение. Опоры ТП представляют собой полосы из нержавеющей стали.

Около границы действительного уровня воды коллекторы теплоносителя снабжены защитными выгородками, которые выполнялись как герметичными, так и сообщенными с паровым пространством П контура. Они были предназначены для предотвращения упаривания коррозионно-активных примесей на границе раздела фаз. Имелся ряд проблем с обеспечением плотности выгородок и контроля, поэтому в последних модификациях ПГ выгородки были заменены наплавкой из коррозионно-стойкой высоконикелевой стали.

Сепарационные устройства представляют собой два пакета жалюзи. В штатной конструкции ПГ из-за умеренной паровой нагрузки на зеркале испарения выравнивающие устройства не требуются. Однако в дальнейшем на нескольких парогенераторах Ровенской АЭС и АЭС “Дукованы” были установлены локальные дырчатые листы в зоне “горячего” коллектора, что привело к снижению набухания уровня воды в зоне максимальной паровой нагрузки, исключило подтопление жалюзийного сепаратора и обеспечило защиту фланцевого разъема от заброса влаги.

Первоначально питательная вода в ПГВ-440 подавалась в глубину пучка на “горячей” стороне в горизонтальный коридор между верхней и нижней частями трубного пакета. Из-за этого на нескольких энергоблоках были выявлены коррозионно-эрозионные повреждения раздающих коллекторов. В связи с этим была проведена модификация коллектора раздачи питательной воды, причем на разных АЭС использовались различные варианты конструкций этого устройства. Одновременно реконструировались также узлы отвода продувочной воды с целью повысить эффективность удаления примесей.

В последних вариантах конструкции парогенератора ПГВ-440 под трубным пучком установлены смывные устройства для удаления шлама из нижней части корпуса ПГ.

Таблица 1. Основные технические характеристики горизонтальных парогенераторов

Показатель	ПГВ-440 (ВВЭР-440)	ПГВ-1000М* (ВВЭР-1000)	ПГВ-1000МКП* (ВВЭР-1200)	ПГВ-1000МКО* (ВВЭР-ТОИ)	ПГВ-1500 (ВВЭР-1500)
Тепловая мощность, МВт	229	753	803	828	1062.5
Паропроизводительность, т/ч	450	1470	1600	1652	2067
Давление генерируемого пара, МПа	4.61	6.27	7.00	7.0	7.34
Температура пара на выходе, °С	258.9	278.5	285.8	285.8	288.9
Температура теплоносителя, °С	297/270	321/291	328.6/298.2	328.8/297.2	330/297.6
Давление теплоносителя, МПа	12.26	15.70	16.14	16.2	15.70
Длина ПГ, мм	12 400	14 500 (13 840)	13 820	14 820	16 400
Внутренний диаметр ПГ, м	3.2	4.0	4.2	4.2	4.7
Тип расположения труб в пучке	Коридорное	Шахматное	Коридорное	Коридорное	Коридорное
Шаг (вертикальный/горизонтальный), мм	24/29.5	19/23	22/24	22/24	23/22
Количество теплообменных труб, шт.	5536	11 000	10 978	10 978	15 120
Площадь поверхности теплообмена, м ²	2577	6036 (6100)	6100	6660	9490
Высота трубного пучка, м	1.85	2.09	2.288	2.288	2.73
Средняя приведенная скорость пара на зеркале испарения, м/с	0.21	0.31	0.33	0.34	0.28
Средняя тепловая нагрузка поверхности теплообмена, кВт/м ²	90	123	131	135	112

* М – модернизированный, МКП – модернизированный коридорный повышенной мощности, МКО – модернизированный коридорный оптимизированный.

Парогенератор ПГВ-1000

Первым энергоблоком АЭС с ВВЭР-1000 стал энергоблок № 5 Нововоронежской АЭС, который был введен в эксплуатацию в 1980 г. В его составе работают четыре парогенератора ПГВ-1000. По схеме и конструктивному исполнению этот парогенератор подобен ПГВ-440 и создан в развитие концепции горизонтальных ПГ.

Основные конструктивные отличия ПГВ-1000 от ПГВ-440 вызваны существенно большей удельной тепловой нагрузкой при жестких требованиях к габаритам по условиям транспортировки. В ПГВ-1000 для коллекторов применены перлитная сталь (вместо менее прочной аустенитной, как в ПГВ-440) и сепарационная схема с выравниванием паровой нагрузки с помощью погруженного дырчатого листа. В штатной конструкции ПГВ-1000М ПДЛ имеет степень перфорации 7,8% и снабжен по периметру закраиной.

Трубный пучок в парогенераторах ПГВ-1000 расположен более тесно, чем в ПГВ-440, размещение труб шахматное. Как и в ПГВ-440, ТП состоит из четырех пакетов, разделенных опускными коридорами. Способ дистанционирования трубного пучка такой же, как и в ПГВ-440. В последующих модификациях ПГ снабжался дистанционирующими планками, с перфорацией в месте контакта с трубами.

На корпусе ПГ имеются два патрубка для штатной и аварийной подачи питательной воды. Основной поток питательной воды поступает в раздающие коллекторы, расположенные под ПДЛ и снабженные соплами, направленными горизонтально над ТП навстречу один другому. Явления эрозионно-коррозионного износа, обнаруженные в процессе эксплуатации, заставили заменить раздающие коллекторы из углеродистой стали на изготовленные из нержавеющей стали.

В первых модификациях парогенераторов ПГВ-1000М применялись осушители в виде наклонных пакетов жалюзи [8]. На выходе из жалюзи имеется выравнивающий дырчатый лист. При проведении сепарационных испытаний на головном энергоблоке был зафиксирован выброс пароводяной смеси на “горячей” стороне из-за закраины погруженного дырчатого листа, которая препятствовала поддержанию проектного уровня влажности [9]. Для защиты нижней кромки жалюзи от потока пароводяной смеси ПГ был снабжен отбойным щитом, установленным над зазором между корпусом и закраиной ПДЛ с “горячей” стороны. Это решение позволило обеспечить заданное значение влажности генерируемого пара. Впоследствии выброс пароводяной смеси из-под закраины был устранен путем закрытия зазора между корпусом и трубным пучком с “горячей” стороны. В новых проектах парогенераторов закраина с “горячей” стороны

отсутствует. Кроме того, в вариантах конструкций ПГ начиная с 1994 г. жалюзийные сепараторы стали заменять пароприемным дырчатым листом.

После обнаружения повреждений коллекторов теплоносителя были проведены их конструктивные модификации, направленные на повышение надежности их работы.

В процессе эксплуатации парогенераторы ПГВ-1000М были подвергнуты реконструкции в целях снижения концентрации растворимых примесей в водяном объеме и повышения эффективности их удаления с непрерывной продувкой на основе применения принципа ступенчатого испарения. Было установлено, что для получения оптимального распределения примесей следует организовать в “холодном” торце ПГ солевой отсек с отбором от него непрерывной продувки. Под солевым отсеком условно понимается некоторый объем воды с максимальной концентрацией примесей. Реконструкция заключалась в перераспределении раздачи питательной воды по длине ПГ. Для этого были установлены несколько дополнительных раздаточных коллекторов питательной воды на стороне “горячего” торца ПГ и демонтированы некоторые коллекторы на стороне “холодного” торца (рис. 3). Кроме того, со стороны “холодного” торца над и под ПДЛ была поставлена поперечная перегородка, а у днища смонтированы короба, из которых выведены линии отвода непрерывной продувки. В результате проведенных мероприятий изменилось соотношение расходов питательной воды и паропроизводительности по длине ПГ, что привело к изменению характерного распределения примесей в ПГ и смещению зоны максимальной концентрации примесей в “холодный” торец ПГ, т.е. формированию там солевого отсека (рис. 4).

Таким образом, был реализован принцип ступенчатого испарения, что позволяет поддерживать среднюю концентрацию примесей в ответственных зонах ПГ существенно ниже, чем при непрерывной продувке, при заданном ее расходе. В результате были улучшены условия эксплуатации коллекторов и теплообменных труб благодаря снижению коррозионного воздействия на них окружающей котловой воды.

Конструктивная схема с применением ступенчатого испарения была апробирована и оптимизирована в процессе теплотехнических испытаний, проведенных после реконструкции ПГ на различных энергоблоках. Проверялись разные варианты распределения питательной воды, места отборов продувки, а также эффективность установок перегородки над ПДЛ. За период с 1990 по 1995 г. технология ступенчатого испарения была внедрена на всех эксплуатируемых парогенераторах АЭС с ВВЭР-1000 и на нескольких АЭС с ВВЭР-440.

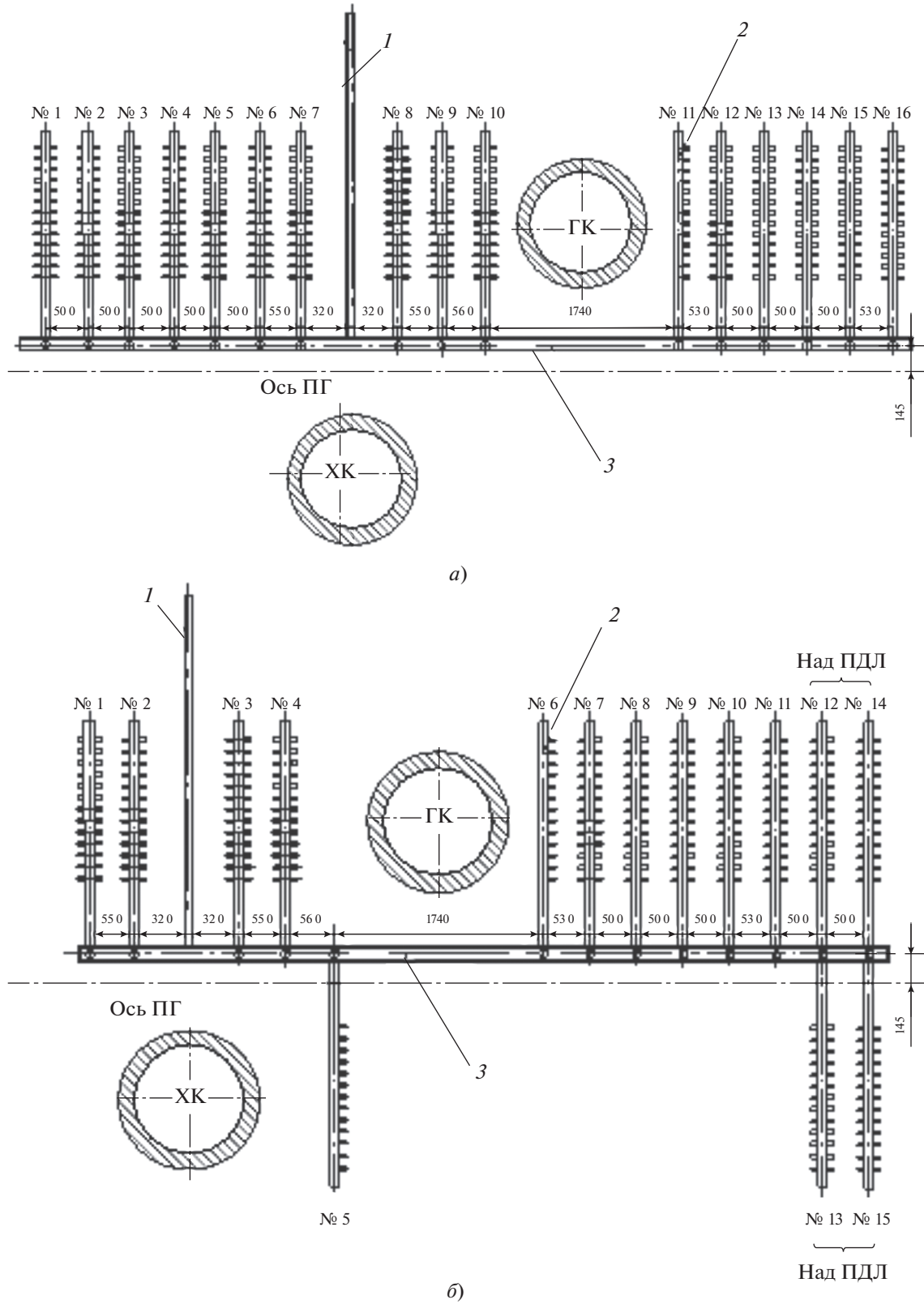


Рис. 3. Схемы водопитания ПГВ-1000 до его реконструкции (а) и после нее (б).

1 – трубопроводы подвода питательной воды; 2 – раздающие трубы с патрубками; 3 – раздающий коллектор питательной воды

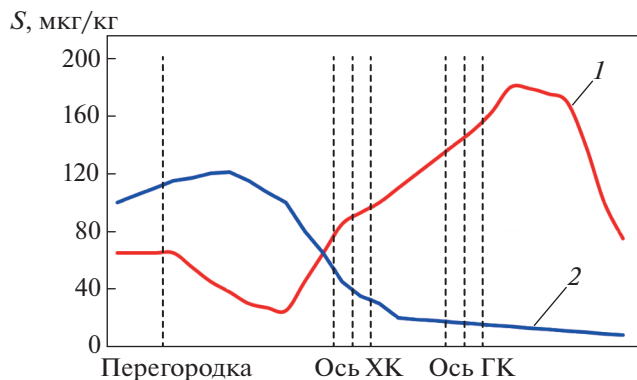


Рис. 4. Характерное распределение солей по длине парогенератора до его реконструкции (1) и после нее (2)

Парогенераторы ПГВ-1000МКП/ПГВ-1000МКО

Конструкции парогенераторов ПГВ-1000МКП и ПГВ-1000МКО, разработанные для реакторов нового поколения ВВЭР-1200 и ВВЭР-ТОИ, усовершенствованы по сравнению с ПГВ-1000М с учетом накопленного опыта эксплуатации.

Основная особенность этих парогенераторов — использование коридорной (более разреженной по сравнению с шахматной) компоновки труб в теплообменном пучке, что позволило:

- упростить доступ обслуживающего персонала в трубный пучок для инспектирования теплообменных труб и их очистки;

- расширить область под ТП для облегчения удаления шламовых отложений с нижней поверхности корпуса;

- увеличить количество воды в ПГ;

- уменьшить вероятность заполнения межтрубного пространства отслоившимся шламом;

- повысить скорость движения пароводяной среды в ТП и тем самым снизить вероятность повреждения теплообменных труб благодаря уменьшению скоростей роста на них отложений и концентрирования коррозионно-активных примесей под ними;

- снизить напряженное состояние коллектора теплоносителя.

Также в парогенераторах нового поколения:

- увеличен расход непрерывной и периодической продувки;

- применяются смывные устройства для удаления шлама с нижних рядов теплообменных труб и корпуса ПГ в период планового ремонта.

Приняты меры по улучшению циркуляции в объеме ПГ новой конструкции для того, чтобы избежать скопления шлама в отдельных участках трубного пучка, особенно в нижней части, и связанных с этим коррозионных повреждений трубки. Для этого изменена раздача питательной

воды с тем, чтобы большая ее часть попадала в опускной коридор и увеличивалась кратность ее циркуляции, остальная часть питательной воды по-прежнему подается в зону над ТП.

Особенностью ПГ нового поколения является также наличие дополнительных патрубков для подсоединения систем пассивного отвода тепла, которые применяются при авариях, связанных с обесточиванием АЭС. Устанавливаются специальные патрубки и трубопровод для подачи реагентов во время химической отмывки.

На атомных электростанциях с ВВЭР-ТОИ используется новая компоновка парогенераторов ПГВ-1000МКО в реакторном здании, предусматривающая отвод пара из ПГ через один патрубок [10]. Как показано в [11, 12], такая схема отвода пара приводит к образованию существенно неравномерного поля скорости пара в паровом пространстве над зеркалом испарения, вызванного течением пара по траектории наименьшего сопротивления, которое может привести к сверхнормативному уносу влаги из ПГ при соблюдении остальных эксплуатационных параметров. Авторами предлагается использовать ППДЛ с переменной степенью перфорации для обеспечения допустимого уровня влажности выходящего пара в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000МКО с одним паровым патрубком.

В парогенераторе ПГВ-1000МКП пар отводится через десять патрубков, расположенных равномерно на верхней поверхности корпуса ПГ, так же как и в ПГВ-1000М.

Парогенератор ПГВ-1500

Горизонтальный парогенератор большой мощности ПГВ-1500 предназначен для работы в составе реакторной установки с ВВЭР-1500 и разрабатывался на основе сохранения принципа преемственности основных технических решений, использованных при создании ПГВ-1000М. Так, например, в ПГВ-1500 реализована проверенная в ПГВ-1000М технология ступенчатого испарения для снижения концентрации растворимых примесей в водяном объеме и повышения эффективности их удаления с непрерывной продувкой. Солевой отсек и устройство продувки выполнены того же типа, что и ПГВ-1000М.

Вместе с тем при разработке конструкции ПГВ-1500 применено несколько новых прогрессивных решений.

В ПГВ-1500 использовалась коридорная компоновка пучка теплообменных труб, преимуществом которой, по сравнению с шахматной, является меньшая затесненность пучка, что улучшает циркуляцию воды и снижает вероятность забивания межтрубного пространства отслоившимся шламом.

Для интенсификации циркуляции воды, помимо снижения гидравлического сопротивления теплообменного пучка, приняты меры по обеспечению конденсации пара, захватываемого в опускные каналы, что достигается подачей части питательной воды по перфорированным трубам непосредственно в опускной коридор.

Сепарационная схема ПГВ-1500, так же как и у ПГВ-1000М, основана на гравитационной сепарации и включает в себя ПДЛ и ППДЛ. Однако для ПГВ-1500 потребовалось использовать дырчатые листы с переменной степенью перфорации. Это связано с тем, что в более мощном ПГВ-1500 неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения значительно выше, чем в ПГВ-1000М, поэтому для ее полноценного выравнивания необходим ПДЛ с переменной степенью перфорации (в зоне “горячего” коллектора степень перфорации меньше, а в зоне “холодного” коллектора – больше). Кроме того, для оптимизации компоновочных решений по парогенератору ПГВ-1500 в составе реакторной установки, уменьшения сопротивления по паровому тракту, а также упрощения конструкции и снижения стоимости узла отвода пара парогенератора изменено количество паропроводящих патрубков. Вместо десяти, равномерно распределенных по верхней поверхности корпуса ПГВ-1000М, в ПГВ-1500 используются лишь два. Из-за уменьшения количества патрубков усиливается неравномерность отвода пара из ПГ, возникают существенные продольные скорости пара и вследствие этого ухудшаются сепарационные характеристики ПГ. Для выравнивания скоростей пара в паровом объеме целесообразно использовать ППДЛ с переменной степенью перфорации. Оптимизация такой перфорации для ПДЛ и ППДЛ была предложена в работах [13–17].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПГ

Исследования гидродинамических процессов, происходящих в горизонтальных парогенераторах, начались сразу же после ввода их в эксплуатацию, но особенно активно их стали проводить после сооружения ПГВ-1000 в связи с тем, что условия работы этого ПГ были весьма напряженными из-за существенно неравномерного тепловыделения в плотном шахматном пучке и возникающих вследствие этого проблем сепарации пара. Поэтому в 80–90-х годах прошлого столетия были выполнены экспериментальные исследования гидродинамических процессов на различных атомных электростанциях, на которых установлены ПГВ-1000.

Значительное количество опытных данных по движению пароводяной смеси в объеме горизонтального ПГ было получено на основе показаний турбинных расходомеров и датчиков

паросодержания. В этих исследованиях участвовали специалисты разных организаций, таких как ОКБ “Гидропресс”, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского (ЭНИИ), Всероссийский теплотехнический институт (ВТИ), НИУ “Московский энергетический институт” (НИУ МЭИ), Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций (ЭНИЦ) и др. Результаты исследований были представлены в многочисленных статьях [18–40] и затем обобщены в монографии [1].

Следует отметить, что система измерений, используемая на натуральных ПГ, не позволяет получить детальную картину распределения тепловых параметров в объеме ПГ. Поэтому были созданы специальные установки, моделирующие гидродинамику двухфазного течения пароводяной смеси в горизонтальном ПГ.

В конце 1990-х годов в ВТИ была разработана экспериментальная водовоздушная модель парогенератора, на которой изучалось течение двухфазной среды применительно к условиям натурального ПГВ-1000 [41–43]. Особенностью проведенных исследований являлось использование значительного количества датчиков (15 шт.) определения объемного газосодержания методом просвечивания γ -лучами. Это позволило составить детальную картину распределения этого параметра во всех характерных зонах ПГ: трубном пучке, свободных каналах, под и над ПДЛ. К недостаткам экспериментов следует отнести низкое давление (около 0,1 МПа), что затрудняет непосредственный перенос результатов на натурные условия работы ПГВ-1000. Однако полученный массив опытных данных представляет интерес для валидации расчетных кодов, разрабатываемых для моделирования теплогидравлических процессов в горизонтальном ПГ [44, 45].

В связи с проектированием ПГВ-1500, начатым в начале 2000-х годов, ОКБ “Гидропресс” инициировал создание двух экспериментальных установок для получения опытных данных, пригодных для валидации расчетных программ, в частности кода STEG [46], который в то время находился в опытно-промышленной эксплуатации.

В 2006 г. была создана модель горизонтально-парогенератора ПГВ-1500 [47], а также реализована экспериментальная программа. Ограничения по подводимой мощности не позволили довести давление в модели до номинального значения. Эксперименты проводились только при 3 МПа, поэтому полученные данные нельзя непосредственно перенести на условия эксплуатации ПГВ-1500. Тем не менее, результаты экспериментов являются важной составляющей накопленной на сегодняшний день базы данных по теплогидравлическим характеристикам гори-

зонтальных ПГ, они использовались для валидации кода STEG [48, 49].

Специалистами ЭНИЦ в 2012–2014 гг. был сконструирован стенд ПГВ, на котором было проведено несколько серий экспериментальных исследований [50], целями которых являлись определение гидравлических сопротивлений ПДЛ и изучение влияния равномерной и переменной перфорации дырчатого листа на выравнивающую способность ПДЛ [51–53]. Полученные опытные данные использовались для валидации кода STEG [54].

Далее кратко рассмотрены конструкции упомянутых выше экспериментальных установок.

Установка ВТИ

В экспериментальной модели ПГ (рис. 5) в прозрачном корпусе размещались трубный пучок шахматной компоновки, ПДЛ и опускной канал [41–43]. Пучок состоял из 57 рядов труб типоразмером 16.0×1.4 мм по 10 шт. в каждом. Его геометрические характеристики соответствовали параметрам пучка натурального ПГВ-1000. В первом варианте модели применялся организованный контур циркуляции – трубный пучок по всей высоте был огражден листами из оргстекла для исключения выхода двухфазной среды из пучка. Во втором варианте модели стенки, ограждающие трубный пучок, были отодвинуты, что привело к образованию свободных каналов.

Расстояние между трубным пучком и ПДЛ составляло 0.25 м, при этом применялись ПДЛ с различной степенью перфорации – от 3 до 20%. Прозрачный корпус модели позволял визуально наблюдать гидродинамические процессы, происходящие внутри. Приведенная скорость воздуха в модели могла изменяться от 0 до 1.5 м/с.

Течение водовоздушной смеси происходило под действием естественной конвекции. Воздух подавался в трех горизонтальных сечениях по высоте трубного пучка, таким образом моделировался процесс парообразования. Объемное газосодержание определяли с помощью просвечивания γ -лучами. Также учитывались перепады давления по высоте трубного пучка и уровни воды в модели и над дырчатым листом. Скорость тече-

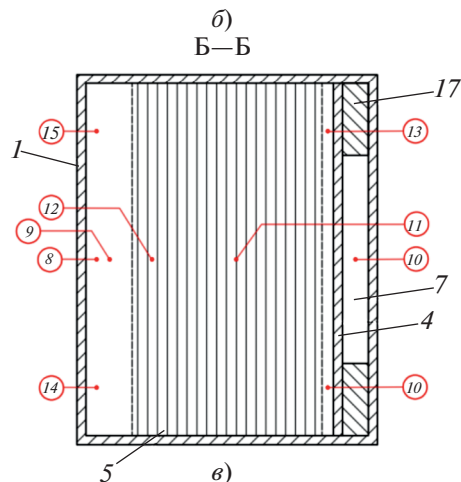
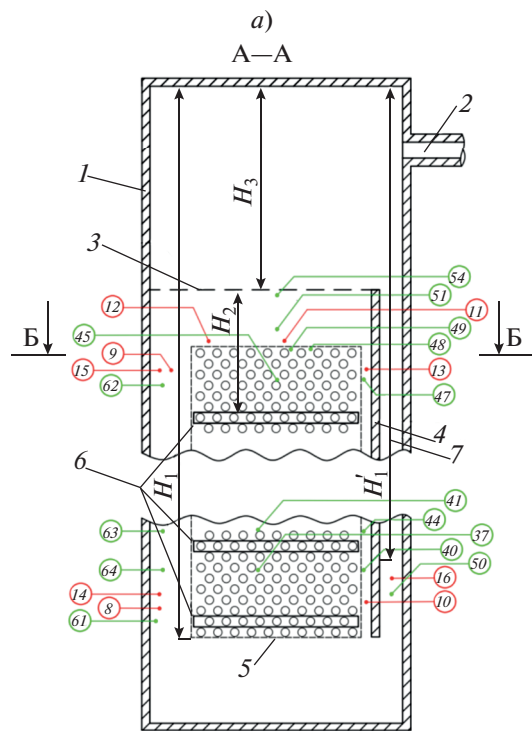
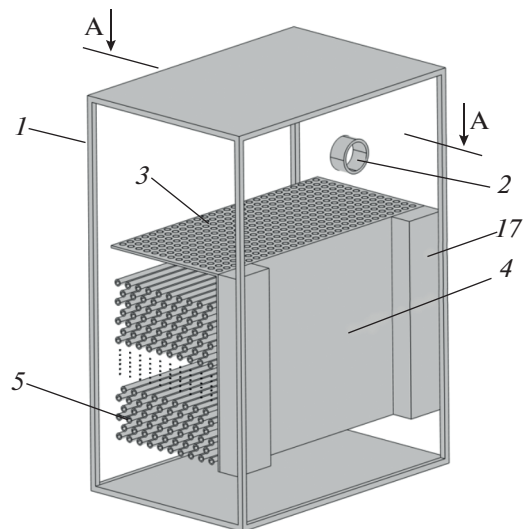


Рис. 5. Экспериментальная установка ВТИ (первый вариант модели).

a – общий вид; *б* – продольный разрез (вид сбоку); *в* – поперечный разрез (вид сверху).

1 – корпус; 2 – патрубок отвода воздуха; 3 – дырчатый лист; 4 – закраина; 5 – трубный пучок; 6 – подвод воздуха; 7 – опускной канал; 8–16 – турбинные расходомеры; 17 – вытеснитель; 41–64 – измерения объемного газосодержания; H_1 , H_1' , H_2 , H_3 – измерения массового уровня воды

ния воды измерялась турбинными расходомерами, установленными в разных зонах модели.

Модель ПГВ-1500 (ОКБ “Гидропресс”)

Экспериментальная модель ПГВ-1500 [47] представляла собой фрагмент парогенератора от внутренней поверхности выгородки, размещенной в прочном цилиндрическом сосуде. На рис. 6 представлен рабочий участок модели, ширина которого составляет 241 мм.

Рабочий участок включает в себя обогреваемый и необогреваемый трубные пучки, погруженный дырчатый лист с закраиной со стороны необогреваемого пучка и пароприемный дырчатый лист. Источник тепла для обогреваемого пучка труб моделируется с помощью потока слабеперегретого пара внутри труб.

Расположение труб в пучках – коридорное. В вертикальном направлении 36 рядов труб с шагом 22 мм. В горизонтальном направлении трубы раз-

мещены с шагом 24 мм в 36 и 18 рядах в обогреваемом и необогреваемом пучке соответственно.

Слабо перегретый пар подавался в модель через девять перфорированных трубок под обогреваемым пучком и через пять трубок под необогреваемым пучком. Давление в рабочем участке установки поддерживалось на уровне 3.3 МПа.

Геометрические характеристики ППДЛ, ПДЛ и закраины выбраны в соответствии с параметрами ПГВ-1500. Пучки труб, закраины ПДЛ и стенки выгородки рабочего участка образуют коридоры, так же как и в натурном ПГ (“горячий” коридор на стороне ОП, центральный коридор между пучками труб, “холодный” коридор на стороне НОП и коридор за закраиной).

Регулирование и поддержание уровня воды над ПДЛ в экспериментах осуществлялось путем изменения расхода питательной воды, подаваемой через перфорированные трубы, размещенные под ПДЛ на стороне обогреваемого пучка и в центральном коридоре.

Для исследования гидравлических процессов в модели были установлены датчики для измерения следующих параметров:

- перепада давления на ПДЛ и на пучке труб;
- паросодержания в коридорах и в зоне под ПДЛ;
- уровня воды над ПДЛ на “горячей” и “холодной” сторонах.

Всего на гидродинамической модели ПГВ-1500 было исследовано девять режимов, в том числе чисто барботажные без тепловыделения и режимы с тепловыделением в трубном пучке.

Стенд ПГВ (ЭНИЦ)

Стенд ПГВ [50] был разработан для исследования выравнивающей способности ПДЛ различных конструкций в условиях работы парогенератора ПГВ-1500. Рабочий участок выполнен в виде поперечного фрагмента парогенератора ПГВ-1500. Фрагмент имеет толщину 100 мм и помещен в сосуд высокого давления (рис. 7). В рабочем участке моделируется течение двухфазной среды в верхней половине ПГ – от верхних рядов трубных пакетов до пароприемного щита. На стенде ПГВ пар подается в нижней части рабочего участка через раздаточный коллектор, верхняя поверхность которого имеет равномерную перфорацию – 104 отверстия диаметром 6 мм. Паровой коллектор разделен с помощью внутренней перегородки на “горячую” и “холодную” половины, подача греющего пара в которые осуществляется отдельно, что позволяет создавать неравномерный расход пара по длине рабочего участка.

Над паровым коллектором расположен трубный пучок коридорной компоновки, по высоте состоящий из трех рядов трубок наружным диа-

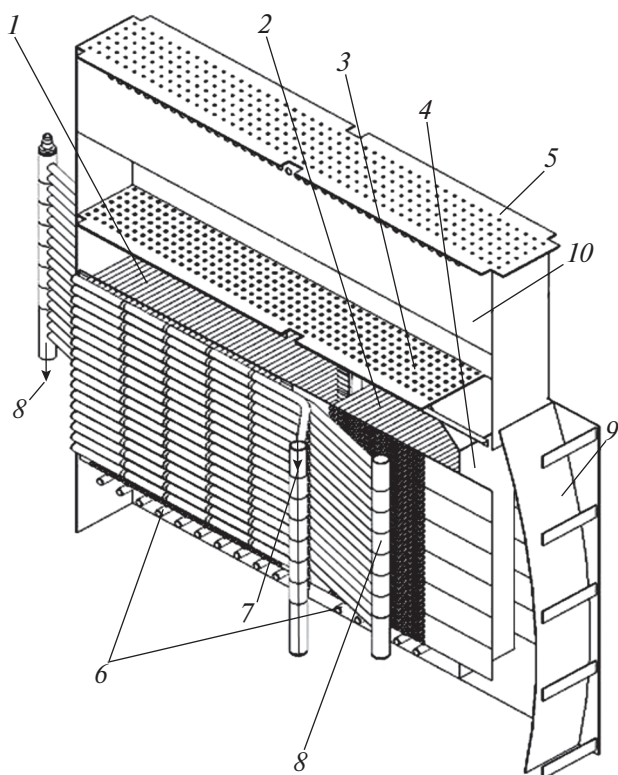


Рис. 6. Конструкция рабочего участка испытательной установки ПГВ-1500.

1 – обогреваемый пучок (ОП); 2 – необогреваемый пучок (НОП); 3 – ПДЛ; 4 – закраина ПДЛ; 5 – ППДЛ; 6 – секции подпаривания каждого пучка; 7 – вход греющего пара в два входных коллектора обогреваемого пучка; 8 – выход конденсата греющего пара из двух выходных коллекторов; 9 – имитатор корпуса ПГ; 10 – вертикальные выгородки рабочего объема модели

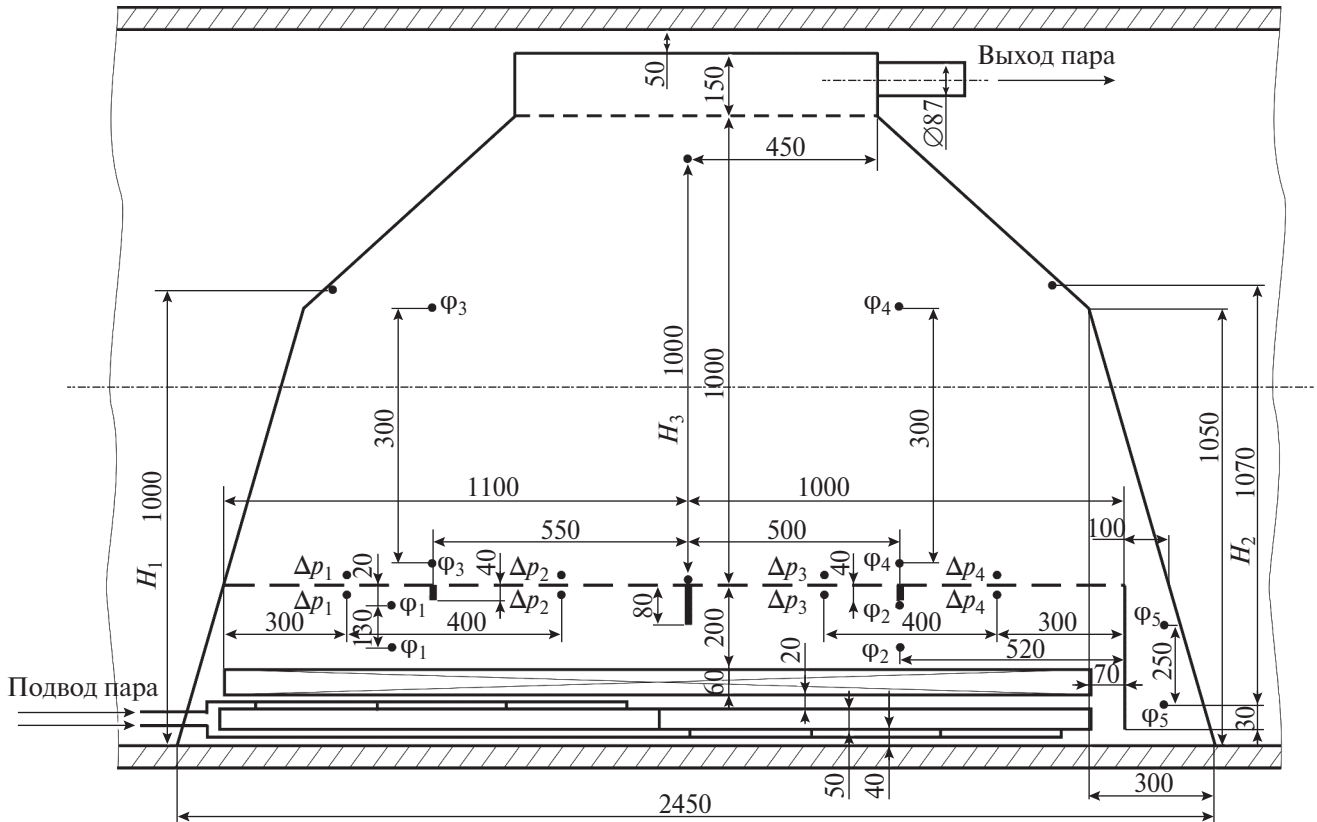


Рис. 7. Модель (поперечная вырезка) парогенератора ПГВ-1500.

Датчики измерения: $\Delta p_1 - \Delta p_4$ – перепадов давления; $\phi_1 - \phi_5$ – паросодержания; $H_1 - H_3$ – уровни воды над ПДЛ

метром 16 мм. Над ним располагается погруженный дырчатый лист, один край которого вплотную присоединен к боковой стенке рабочего участка, а другой край имеет закраину. Между закраиной и стенкой рабочего участка предусмотрен зазор для слива воды с ПДЛ. Так же как и в натурном ПГ, на стенде под ПДЛ установлены опорные балки с отверстиями для перетока пароводяной смеси. В экспериментах использовались два типа погруженного дырчатого листа: со степенью равномерной перфорации 5.7% и степенью неравномерной перфорации по левой стороне 4.1%, по правой – 8.3%. Геометрические параметры ПДЛ соответствуют натурным значениям: диаметр отверстий 13 мм, толщина листа 6 мм. Для обеспечения в рабочем участке такого же изменения скорости пара по высоте парового объема, как в натурном ПГ, паровой объем модели спрофилирован так же, как корпус натурального ПГ. В верхней части рабочего участка установлен пароприемный дырчатый щит, степень перфорации которого составляет 4.5%. Расстояние между ПДЛ и ПППДЛ в модели равно 1100 мм, что практически соответствует натурной высоте парового объема парогенератора.

Таким образом, схема течения пароводяной смеси в рабочем участке стенда ПГВ выглядит

следующим образом. Пар из раздаточного коллектора подается в рабочий участок, заполненный насыщенной водой, с заданным расходом, который может быть как равномерным по длине рабочего участка, так и неравномерным (расход на одной половине больше расхода на другой половине). Затем пар движется сквозь трубный пучок и поступает в область под ПДЛ, где он из-за высокого гидравлического сопротивления ПДЛ растекается в горизонтальном направлении и через отверстия в ПДЛ попадает в двухфазный слой над ПДЛ и далее в паровой объем. В паровом объеме происходит сепарация пара, после пароприемного дырчатого листа пар движется в коллектор и далее в сбросной трубопровод. Вода, вынесенная паром на ПДЛ, отводится через зазор между закраиной и стенкой рабочего участка.

Расположение датчиков истинного объемного паросодержания ϕ , перепадов давления Δp и массовых уровней H показано на рис. 7 точками.

На стенде ПГВ было выполнено несколько серий экспериментов.

Серия “1 : 1”. Равномерная подача пара на “горячую” и “холодную” стороны модели. Суммарный массовый расход пара варьировался в диапазоне 4–8 т/ч.

Серия “3 : 1”. Неравномерная подача пара на “горячую” и “холодную” стороны модели. Массовый расход пара составлял 5.30–5.43 и 1.82–1.89 т/ч на “горячей” и “холодной” стороне соответственно.

Серия “2 : 0”. Сильно неравномерная подача пара на “горячую” и “холодную” стороны модели. Массовый расход пара составлял 3.93–4.34 и 0.08–0.24 т/ч на “горячей” и “холодной” стороне соответственно.

Серия “0 : 2”. Сильно неравномерная подача пара на “горячую” и “холодную” стороны модели. Массовый расход пара составлял 0 и 4.16–4.40 т/ч на “горячей” и “холодной” стороне соответственно.

Всего для ПДЛ было выполнено 26 режимов с равномерной и 20 режимов с неравномерной перфорацией.

Сравнительный анализ экспериментальных установок

Основные параметры экспериментальных установок, рассмотренных выше, сведены в табл. 2, там же приведены результаты экспериментов, выполненных на натурном парогенераторе ВВЭР-1000 [9], и основные параметры горизонтального парогенератора ВВЭР-1500 согласно [7].

На всех установках соблюдались геометрические размеры ТП (диаметр труб, шаг, компоновка), ПДЛ и ППДЛ (диаметр отверстий, степень перфорации, длина закраины). Также на всех установках была предусмотрена возможность варьирования такого важного параметра, как средняя приведенная скорость пара на зеркале испарения.

Только на стенде ПГВ воспроизводились рабочие параметры среды натурного ПГ, на двух других установках рабочее давление было снижено по сравнению с требуемым значением, а на установке ВТИ пароводяная среда моделировалась водовоздушной смесью.

Рабочие участки всех установок представляют собой двумерные вырезки ПГ, т.е. их глубина невелика и движение среды происходит только в двух направлениях – по высоте и ширине, тогда как натурный ПГ является трехмерным объектом, в котором перетоки пароводяной среды реализуются по всем трем направлениям.

Только на установке ПГВ-1500 имеется возможность генерировать пар благодаря кипению пароводяной смеси на греющих трубах. В двух других установках генерация пара моделируется путем подачи пара/воздуха из перфорированных коллекторов/труб, расположенных в нижней части трубного пучка.

Неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения, которая наблюдается в натурном ПГ, моделируется на стендах ПГВ-1500 и ПГВ; на

установке ВТИ паровая нагрузка на зеркале испарения распределена равномерно.

На стенде ПГВ-1500 имеются два трубных пучка, что позволяет учитывать влияние на течение двухфазной смеси наличия коридора между пучками. На стендах ВТИ и ПГВ размещено по одному трубному пучку, что ограничивает моделирование гидродинамических процессов, происходящих в натурном ПГ.

На стенде ПГВ пучок состоит всего из трех рядов труб по высоте, что недостаточно для моделирования течения двухфазной среды в натурном трубном пучке. На стендах ВТИ и ПГВ-1500 трубные пучки более протяженные по высоте – 57 и 36 рядов труб соответственно.

Системы измерений, используемые на моделирующих установках, позволяют определять истинное паросодержание, перепады давления, скорости среды (за исключением стенда ПГВ) и массовый уровень воды. Следует отметить, что влажность пара, покидающего рабочий участок, измерялась только на стенде ПГВ-1500 для одного режима, других измерений влажности не проводилось.

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПГ

Обзор расчетных исследований

В конце 1990-х годов стало очевидно, что экспериментальные исследования гидродинамических процессов в горизонтальных ПГ требуют подкрепления со стороны расчетного моделирования. Возникла потребность в создании специализированного расчетного средства, поскольку существовавшие на тот момент наиболее совершенные расчетные коды CATHARE, TRAC, RELAP5 не позволяли моделировать сложные трехмерные течения пароводяной смеси в объеме ПГ со всеми внутренними конструкциями. По заказу ОКБ “Гидропресс” такую работу начал ЭНИЦ, где был разработан теплогидравлический код STEG, специально предназначенный для расчета трехмерных течений двухфазной среды в горизонтальном парогенераторе [55–57]. В коде используется двухжидкостная модель пароводяной среды. Для воды и пара формулируются уравнения сохранения массы, импульса и энергии, дополненные соотношениями для описания межфазных взаимодействий на поверхности раздела пар – жидкость, а также взаимодействий с окружающими конструкциями. Было выполнено моделирование гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 и определены основные особенности течения пароводяной смеси. Проведен сравнительный анализ результатов расчета с экспериментальными данными из работы [9] по паросодержаниям и

Таблица 2. Основные параметры экспериментальных установок и горизонтальных парогенераторов

Параметр	Модель ВТИ	ПГВ-1500			ПГВ	ПГ ВВЭР-1000	ПГ ВВЭР-1500
		Рабочие параметры					
Рабочая среда	Воздух + вода	Пар + вода	Пар + вода	Пар + вода	Пар + вода	Пар + вода	Пар + вода
Давление, МПа	0.1	3.3	7	6.27	7.34	7.34	7.34
Температура, °С	20	239.2	285.8	278.5	288.9	288.9	288.9
Тепловая мощность, МВт	0	2.5	0	750	1062.5	1062.5	1062.5
Генерация пара греющими трубами или подача пара/воздуха через коллекторы	Подача воздуха	Греющие трубы + подача пара	Подача пара	Греющие трубы	Греющие трубы	Греющие трубы	Греющие трубы
Массовый расход пара/воздуха, т/ч	0.05–1.4	6–10	4–8	1470	2067	2067	2067
Подача питательной воды	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
Средняя приведенная скорость пара/воздуха на зеркале испарения, м/с	0.07–2.0	0.24–0.56	0.15–0.29	0.31	0.28	0.28	0.28
Геометрические параметры							
Сосуд	2D-вырезка горизонтального ПГ			Цилиндр	Цилиндр	Цилиндр	Цилиндр
Размеры сосуда (горизонтальный/вертикальный/ширина), м	0.364/3.6/0.5	2.25/2.25/0.25	2.37/1.62/0.1	Длина – 13.4, диаметр – 4.0	Длина – 15.6, диаметр – 4.7	Длина – 15.6, диаметр – 4.7	Длина – 15.6, диаметр – 4.7
Количество трубных пучков	1	2	1	4	4	4	4
Компоновка трубного пучка	Шахматная	Коридорная	Коридорная	Шахматная	Коридорная	Коридорная	Коридорная
Шаг труб (вертикальный/горизонтальный), мм	19/23	22/24	22/24	19/23	22/24	22/24	22/24
Диаметр труб, мм	16	16	16	16	16	16	16
Число труб	570	1944	255	11000	15120	15120	15120
Степень перфорации ПДЛ, %	4.5; 7.5; 12.0	10.62	5.7; 4.1; 8.3	3.7; 6.1	Еще не определена	Еще не определена	Еще не определена
Число датчиков/метод измерения/расположение датчиков							
Объемное паросодержание	15/γ-просвечивание/трубный пучок, под ПДЛ и коридоры	15/гидростатический метод/под ПДЛ, коридоры	5/гидростатический метод/над и под ПДЛ, коридоры	16/гидростатический метод/под ПДЛ, коридоры	–	–	–
Скорость воды	9/турбинный расходомер/над трубным пучком и коридоры	4/турбинный расходомер/коридоры	0	5/турбинный расходомер/коридоры	–	–	–
Перепад давления	4/трубка Нифера/трубный пучок	3/дифманометр/над ПДЛ и в трубном пучке	4/дифманометр/над ПДЛ	0	–	–	–
Массовый уровень	3/гидростатический метод/над и под ПДЛ и на всю модель	3/гидростатический метод/над ПДЛ и на всю модель	2/гидростатический метод/над ПДЛ и на всю модель	1/гидростатический метод /над ПДЛ	–	–	–
Количество экспериментов	34	9	46	1	–	–	–

скоростям двухфазной среды, измеренным на ПГВ-1000 энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС, и получено хорошее совпадение.

Эксперименты по расчетному моделированию теплогидравлических процессов в горизонтальном ПГ были продолжены и другими специалистами.

Близкий подход к моделированию течения двухфазных потоков в пористых средах использовался в статье [58]. Авторы также разработали двухжидкостную модель с учетом пористой среды для трехмерного моделирования течений двухфазных сред в пучках труб или стержней и предложили формулы для расчета межфазного силового взаимодействия. В [59] эта модель была применена для анализа гидродинамических процессов в горизонтальном ПГ. Моделировались установившиеся режимы на нескольких уровнях мощности (50–110%). Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов [9] показало их удовлетворительное согласие. В работе [60] был представлен расчетный анализ аварии с потерей питательной воды в ПГВ-440. Рассматриваемая авария характеризовалась быстрым снижением уровня воды в парогенераторе, оголением ТП и уменьшением количества тепла, отводимого из I контура. Все важные гидродинамические и теплофизические явления были достоверно предсказаны в расчете.

В [61] использовался расчетный теплогидравлический код TRAC [62] для моделирования теплогидравлики модернизированного парогенератора ПГВ-1000М. Описаны закономерности двухфазного течения пароводяной смеси в объеме парогенератора.

В статье [63] авторами выполнен анализ пространственного течения пароводяной смеси в парогенераторе ПГВ-1000 с помощью разработанного ими кода БАГИРА [64]. Этот код предназначен для моделирования нестационарных неравновесных течений двухфазных сред в элементах оборудования и циркуляционных контурах АЭС с водо-водяными и кипящими реакторами. Возможно моделирование в одномерной, двумерной и трехмерной постановках. Выполненное сопоставление с экспериментальными данными [9] показало достаточно хорошее совпадение. Затем авторы провели расчетный анализ начальной стадии аварийного процесса с течью из “горячего” коллектора внутри корпуса ПГ при работе энергоблока на номинальной мощности.

В работе [65] для расчета горизонтального парогенератора ПГВ-1000 в установившемся и переходном режимах использовался теплогидравлический код RELAP5 [66]. В этом исследовании проводились многочисленные расчеты с различными нодализациями и в результате был получен набор важных характеристик парогенератора.

В [67] авторы предложили расчетную модель горизонтального парогенератора ПГВ-440 для трехмерного кода PORFLO, в котором используется концепция пористой среды для моделирования двухфазного потока в трубных пакетах. Как и в описанных ранее кодах, в PORFLO применялась двухжидкостная модель. В работе представлены результаты моделирования стационарного режима при мощности 250 МВт и проведено сопоставление с результатами расчетов по коду Fluent [68]. Показано, что коды дают близкие значения параметров.

В статье [69] для моделирования теплогидравлических процессов горизонтального парогенератора ВВЭР-1000 был использован код ANSYS CFX [70]. Применялась двухжидкостная модель. Геометрические характеристики ПГ моделировались с учетом всех его особенностей, формулы для расчета обмена массой, количеством движения и теплом на межфазной границе выводились после решения соответствующих уравнений. Для описания силы межфазного сопротивления использовалась модель Ишии – Зубера [71]. Трубные пакеты описывались с использованием модели пористой среды. Распределение тепла в трубах I контура рассчитывалось с помощью одномерной модели конвективной теплопроводности. Авторы провели расчеты с ПДЛ и без ПДЛ и получили заметные различия. Также было показано хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными [9].

В работе [72] было выполнено расчетное исследование распределения объемного паросодержания в горизонтальном ПГ с использованием модели дрейфа [73]. Процессы в ПГВ-1000 моделировались с помощью кода Fluent [68]. Показано, что на распределение объемного паросодержания в горизонтальном ПГ существенно влияет наличие ПДЛ. Рассчитанные значения объемного паросодержания достаточно хорошо согласовались с опытными данными [9] и результатами вычислений [63, 69].

Авторы работы [74] для исследования трехмерных гидродинамических процессов в горизонтальном ПГ в нормальных и переходных режимах применяли код Fluent. Из-за сложности геометрического строения трубного пучка для его описания использовали модель пористой среды. Движение каждой фазы рассчитывали с помощью осредненных уравнений Навье – Стокса. В этой работе полученные значения объемного паросодержания, давления и массового уровня котловой воды сопоставлялись с имеющимися экспериментальными результатами. Было получено удовлетворительное согласие расчетных и опытных данных.

В статье [75] моделировался парогенератор ПГВ-1000 с помощью CFD-кода общего назначе-

ния, в который были включены формулы для межфазного сопротивления из [76] и для потерь давления на трубном пучке из [77], а также несколько других соотношений. Трубный пучок описывался моделью пористой среды. В работе было выполнено сравнение с данными [9] и сообщается о хорошем их совпадении.

Краткая характеристика кода STEG

Код STEG основан на двухскоростной двухтемпературной модели двухфазного потока [78]. Каждая фаза (жидкость и пар/газ) рассматривается как отдельная непрерывная среда (континуум), для которой составляются 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.

Модели межфазного сопротивления, гидравлических сопротивлений трубного пучка и погруженного дырчатого листа подробно изложены в [79].

Основные результаты валидации кода STEG

Код STEG был валидирован на экспериментальных данных по теплогидравлике горизонтальных парогенераторов, полученных на стендах ПГВ, ПГВ-1500, модели ВТИ, описанных ранее, и полномасштабном парогенераторе ВВЭР-1000 [9]. Подробно процесс валидации (нодализационные схемы, сеточная сходимость, параметры расчетной модели, детальный анализ результатов) описан в статьях [44, 45, 48, 49, 54, 79], а также в монографии [80]. Здесь авторами обзора приводятся лишь основные результаты (табл. 3) с использованием следующих обозначений: N – количество датчиков; MAD – средняя погрешность расчетных значений относительно экспериментальных данных, полученных от N датчиков. Например, для перепада давления

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\Delta p_{\text{эксп},i} - \Delta p_{\text{расч},i}|}{\Delta p_{\text{эксп},i}} \times 100\%.$$

Наибольшее число опытов было проведено на стендах ПГВ и модели ВТИ: 44 и 34 соответственно. Для натурального ПГ ВВЭР-1000 были проанализированы данные только одного эксперимента. В целом, очевидно, что код STEG может достаточно хорошо воспроизводить полученную в эксперименте картину течения. Обращает на себя внимание довольно большое расхождение со значениями, полученными при расчете разности давлений. Это связано с тем, что в экспериментах на стенде ПГВ были изучены как режимы, характерные для нормальной работы горизонтального парогенератора, для которых было достигнуто достаточно хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными значениями перепадов давления (менее 20%), так и режимы с высокой неравномерностью подачи пара, для которых расхождения иногда достигали 40%.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫРАВНИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПДЛ И ППДЛ

Как уже отмечалось ранее, для горизонтальных ПГ повышенной мощности требуется усовершенствование сепарационной схемы для обеспечения требуемой влажности пара 0.2%. В [13, 14] было предложено реконструировать сепарационную схему посредством применения переменной перфорации ПДЛ и ППДЛ для уменьшения неравномерности паровой нагрузки зеркала испарения ПГ, а также снижения влияния набухания уровня воды вблизи “горячего” коллектора.

В парогенераторе ПГВ-1500 неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения значительно выше, чем в парогенераторе ПГВ-1000М. Скорость пара по длине теплообменного пучка с учетом конденсации части пара при контакте с питательной водой изменяется от 1.2 м/с (в районе “горячего” коллектора) до 0.07 м/с (у “холодного” коллектора), в ПГВ-1000М аналогичные параметры составляют 0.76 и 0.12 м/с. В [14] была предложена приближенная методика расчета переменной перфорации ПДЛ для парогенератора ПГВ-1500. Были выделены четыре расчетные зоны: “горячего” коллектора, “холодного” коллектора, “холодного” торца, “горячего” торца. Расчет по методике [14] позволил определить степень

Таблица 3. Результаты валидации кода STEG

Парогенератор	Количество опытов	Паросодержание		Перепад давления		Скорость воды	
		N	$MAD, \%$	N	$MAD, \%$	N	$MAD, \%$
Модель ВТИ	34	15	≤ 14.0	0	–	9	$\leq 12\%$
ПГВ-1500	4	15	≤ 6.5	3	≤ 17	0	–
ПГВ	44	5	≤ 15.0	4	≤ 40	0	–
ПГ ВВЭР-1000	1	16	≤ 3	0	–	0	–

перфорации для каждой зоны, а также количество отверстий и шаг между ними.

Как уже было отмечено, данная методика является приближенной, поскольку принято довольно много допущений. Например, при вычислении гидравлических сопротивлений на нижней поверхности ПДЛ для течения двухфазной среды используется гомогенная модель для описания сопротивления двухфазному потоку со стороны опорных балок ПДЛ с постоянным значением объемного паросодержания 0.75. Однако, как показывают эксперименты, распределение объемного паросодержания под ПДЛ неоднородно (вблизи нижней поверхности ПДЛ оно близко к единице, а на выходе из трубного пучка оно, как правило, существенно ниже). В методике используется соотношение для определения коэффициента гидравлического сопротивления, полученное для течения газа в длинной трубе с диафрагмой. Но для горизонтальных поперечных перетоков зона между трубным пучком и дырчатым листом имеет довольно сложную форму.

Для уточнения полученных результатов на стенде ПГВ была реализована программа по изучению выравнивающей способности ПДЛ. Были проведены эксперименты при различной подаче пара на “горячую” и “холодную” стороны. Использовались ПДЛ с перфорацией: равномерной (5.7%) и переменной (4.1% на “горячей” половине листа и 8.3% – на “холодной”). Исследовались два соотношения расходов пара, подаваемых на обе стороны: “2 : 0” (3.93–4.34 т/ч на “горячую”, 0.08–0.24 т/ч на “холодную”) и “3 : 1” (5.14–5.36 т/ч на “горячую”, 1.85–1.91 т/ч на “холодную”). Условиям натурного ПГ больше соответствует режим “3 : 1”, режим “2 : 0” использовался только для валидации кода STEG.

Был определен коэффициент выравнивания K , который показывает отношение разности расходов пара на “горячей” и “холодной” сторонах погруженного дырчатого листа к разности подаваемых расходов пара и характеризует степень выравнивания потока пара. Значению $K = 1$ соответствует полное выравнивание, т.е. расход пара на “горячей” стороне ПДЛ равен расходу пара на “холодной” стороне листа. Значение $K = 0$ свидетельствует о полном отсутствии выравнивающей способности ПДЛ. Если $K > 0$, но < 1 , то полное выравнивание не реализуется: расход через “холодную” половину ПДЛ остается меньше расхода через “горячую” половину. Однако если значение $K \gg 1$, то расход через “холодную” половину ПДЛ становится больше расхода через “горячую” половину.

В [53] были обработаны опытные данные для режима подачи пара в режиме “3 : 1”, в результате были получены значения коэффициента $K = 0.8–0.9$ для ПДЛ с равномерной перфорацией,

т.е. выравнивания не происходило и расход пара через “холодную” половину ПДЛ был меньше расхода через “горячую” половину. Для ПДЛ с неравномерной перфорацией коэффициент выравнивания $K = 1.4–1.6$ означает, что расход через “холодную” половину ПДЛ становится больше расхода через “горячую”. Таким образом, использование ПДЛ с неравномерной перфорацией (4.1–8.3%) приводит к значительному увеличению количества пара, поступающего с “горячей” половины на “холодную” относительно ПДЛ с равномерной перфорацией (5.7%).

Более детальный анализ процессов, исследованных в экспериментах, был выполнен с использованием кода STEG [53].

Для серии экспериментов “3 : 1” качественная картина течения пароводяной смеси одинакова для обоих вариантов ПДЛ (рис. 8). Большая часть пара подается на левую (“горячую”) сторону. Из-за этого слева под ПДЛ наблюдается практически чистый пар, а на правой (“холодной”) стороне – относительно большое количество воды. Погруженный дырчатый лист имеет высокое гидравлическое сопротивление, поэтому пар стремится к более равномерному распределению по сечению рабочего участка и течет с левой стороны на правую (зона I). Этот процесс более выражен для ПДЛ с переменной перфорацией, потому что его левая половина имеет более низкую степень перфорации (4.1%) по сравнению с ПДЛ с равномерной перфорацией (5.7%) и, соответственно, обладает большим гидравлическим сопротивлением. Отчетливо видно, что для ПДЛ с неравномерной перфорацией в центральной части вблизи границы пластин с разной степенью перфорации образуется зона с выбросом значительной части пара (зона II) из-за резкого увеличения степени перфорации ПДЛ (степень перфорации 4.1 меняется на 8.3%). Этому способствует наличие водяной “пробки” над “горячей” половиной ПДЛ (зона III). На “горячей” стороне на выходе из ПДЛ расход пара уменьшается. Однако после барботажного слоя над ПДЛ (зона IV) значительное количество пара с “холодной” стороны возвращается на “горячую” сторону (зона V). На “горячей” стороне в паровом пространстве расход пара заметно больше, т.е. полного выравнивания расхода пара не происходит.

На рис. 9 хорошо видно, что ПДЛ с переменной перфорацией обеспечивает более значительный переток пара под ПДЛ с левой половины на правую по сравнению с ПДЛ с равномерной перфорацией. Однако поскольку воды над ПДЛ справа больше, чем слева, ситуация меняется на выходе из зеркала испарения – пар из правой половины возвращается на левую сторону, и снова для ПДЛ с переменной перфорацией этот процесс более интенсивный. В результате ПДЛ с пе-

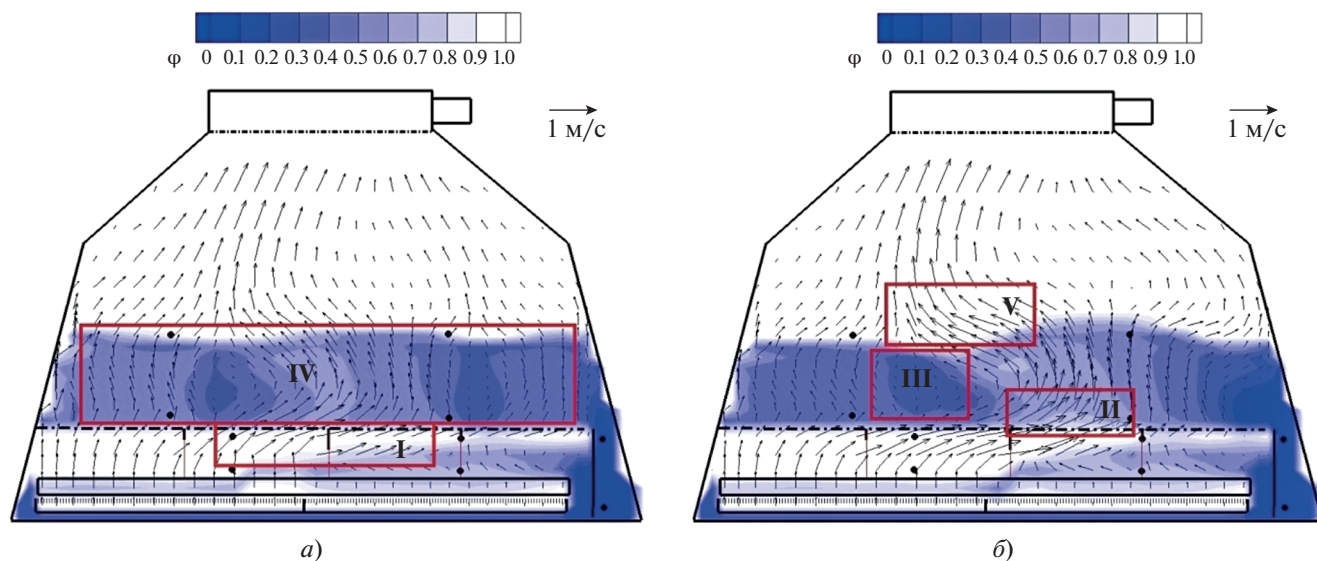


Рис. 8. Паросодержание и приведенная скорость пара при течении двухфазной среды для ПДЛ с равномерной (а) и переменной (б) перфорацией (серия экспериментов “3 : 1”). Зона: I – переток пара слева направо; II – выброс пара; III – водяная “пробка”; IV – барботажный слой; V – переток пара на “горячую” сторону

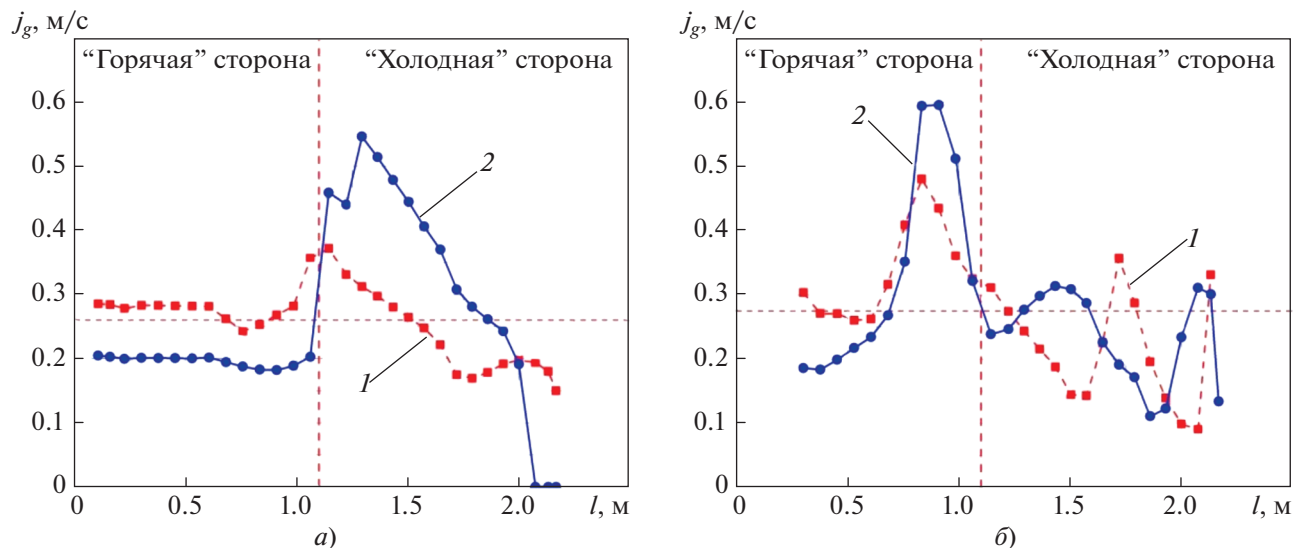


Рис. 9. Зависимость распределения приведенных скоростей пара j_g на ПДЛ (а) и зеркале испарения (б) (серия экспериментов “3 : 1”) от расстояния от левой границы рабочего участка l . Перфорация: 1 – равномерная, 2 – переменная

ременной перфорацией не только не улучшает выравнивание паровой нагрузки, а, наоборот, ухудшает выравнивание по сравнению с ПДЛ с равномерной перфорацией.

В расчетах также определялись коэффициенты выравнивания. Для серии “3 : 1” наблюдалось хорошее согласие коэффициентов выравнивания, полученных по экспериментальным данным и результатам расчетов с помощью кода STEG,

что объясняется совпадением значений экспериментальных и расчетных перепадов давления и объемных паросодержаний. Было установлено, что для ПДЛ с равномерной перфорацией значение K на выходе из ПДЛ немного меньше единицы, однако на выходе из барботажного слоя коэффициент выравнивания снижается примерно в 2 раза, т.е. расход пара на “холодной” половине меньше расхода пара на “горячей”. Для ПДЛ с

Таблица 4. Степень перфорации ПДЛ

ПДЛ	Количество пластин	Степень перфорации (пластины), %			
		первой	второй	третьей	четвертой
1	2	4.8	5.7	—	—
2	3	4.8	4.5	5.7	—
3	4	4.8	4.5	5.5	7.5

переменной перфорацией коэффициент выравнивания на выходе из ПДЛ $K > 1$, это означает, что расход пара на “холодной” стороне ПДЛ превосходит расход пара на “горячей” стороне. Но на выходе из барботажного слоя картина меняется: коэффициент выравнивания уменьшается примерно в 3 раза, это означает, что расход пара на “холодной” половине становится меньше расхода на “горячей”. Значения коэффициента выравнивания после барботажного слоя для ПДЛ с переменной перфорацией находятся в диапазоне 0.74–0.85 и немного превышают значения для ПДЛ с равномерной перфорацией, которые составляют 0.48–0.66. Очевидно, что ПДЛ с переменной перфорацией практически не улучшает выравнивание начального неравномерного расхода пара.

Коэффициент выравнивания K является интегральной характеристикой выравнивающей способности ПДЛ, т.е. он характеризует суммарное количество пара, перетекающего с “горячей” стороны ПДЛ на “холодную”. С учетом процесса сепарации влаги большое значение имеет другая (локальная) характеристика — коэффициент остаточной неравномерности $K_{\text{ост. нер}}$ (отношение максимальной приведенной скорости пара на зеркале испарения к средней скорости пара на нем). Для серии “3 : 1” коэффициент остаточной неравномерности для ПДЛ равномерной перфорации $K_{\text{ост. нер}} = 1.58–1.75$ несколько ниже (т.е. выравнивание немного лучше), чем для ПДЛ с переменной перфорацией $K_{\text{ост. нер}} = 1.78–2.13$. Таким образом, ПДЛ с переменной перфорацией не улучшает локальное выравнивание нагрузки пара.

С помощью кода STEG были выполнены поисковые расчеты в целях определения наилучшей схемы перфорации дырчатых листов для обеспечения критерия минимальной остаточной неравномерной нагрузки. Как было указано ранее, для ПДЛ из двух листов с разной степенью перфорации в зоне резкого изменения степени перфорации возникает значительный выброс пара, при этом выравнивающая способность ухудшается. Поэтому были рассмотрены варианты ПДЛ с более плавным изменением степени перфорации (табл. 4).

Расчеты показали, что наличие промежуточных сглаживающих пластин улучшает выравни-

вание изначально неравномерного расхода пара. Для ПДЛ из трех пластин с разными перфорациями (ПДЛ-2) пропадает высокий расход пара в центральной части, наблюдаемый для ПДЛ-1, состоящего из двух пластин. Для ПДЛ, состоящего из четырех пластин (ПДЛ-3), распределение вертикальной скорости пара на зеркале испарения почти равномерное, а барботажный слой над ПДЛ имеет однородную структуру и почти горизонтальную поверхность зеркала испарения, что свидетельствует о равномерном расходе выходящего пара.

На рис. 10 представлены распределения приведенной скорости пара на ПДЛ и зеркале испарения для вариантов ПДЛ из табл. 4. Хорошо видно, что плавное изменение степени перфорации ПДЛ улучшает выравнивание неравномерной паровой нагрузки. При применении ПДЛ-3 максимальная скорость пара на зеркале испарения составляет 0.31 м/с, а средняя скорость пара — 0.27 м/с, т.е. выравнивание очень хорошее.

В [81] на основе полученного опыта исследования выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ с помощью кода STEG был выполнен анализ различных схем ПДЛ для выравнивания паровой нагрузки натурального парогенератора ПГВ-1500. Рассмотрены три варианта перфорации ПДЛ. В статье [14] на основе приближенного гидравлического метода расчета были предложены ПДЛ-1, ПДЛ-2 с равномерной перфорацией 5% и ПДЛ-3 с неравномерной перфорацией (средняя степень 5%), которая получена по методике [53].

Как показали расчеты, для варианта ПДЛ-1 на стыках пластин с резким изменением степени перфорации образуются локальные зоны пара, имеющего повышенную скорость, которые увеличивают неравномерность потока. Вариант ПДЛ-2 с равномерной перфорацией не обеспечивает полного выравнивания паровой нагрузки, расход пара на “горячей” половине все еще остается значительно больше, чем на “холодной”. Результаты расчета для ПДЛ-3 свидетельствуют о том, что устраняются все недостатки двух предыдущих вариантов. Поле скорости достаточно близко к однородному распределению на всей поверхности ПДЛ-3.

Для количественной оценки выравнивающей способности исследованных схем перфорации

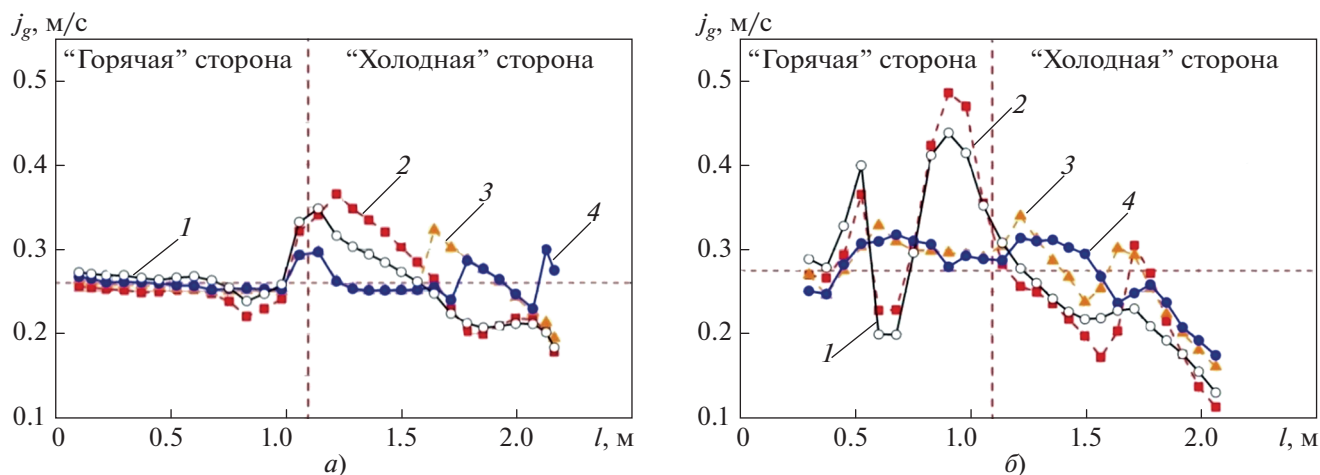


Рис. 10. Зависимость распределения приведенных скоростей пара j_g на ПДЛ с переменной перфорацией (а) и зеркале испарения (б) от расстояния от левой границы рабочего участка l и степени перфорации ПДЛ. Степень перфорации, %: 1 – 4.8; 2 – 4.8–5.7; 3 – 4.8–4.5–5.7; 4 – 4.8–4.5–5.5–7.5

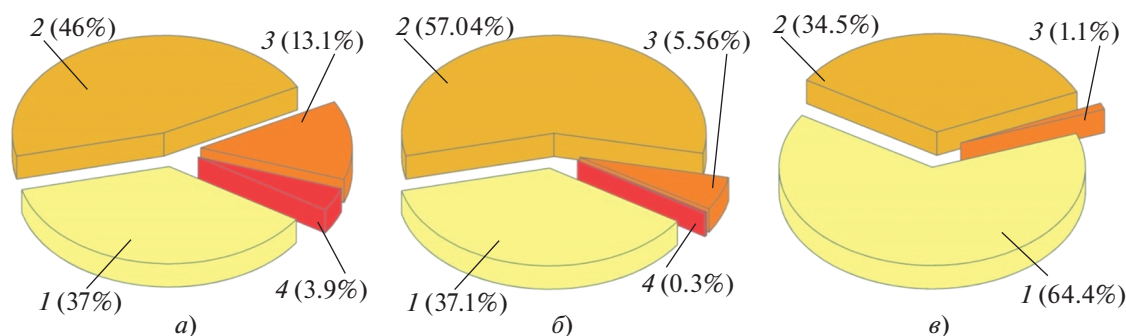


Рис. 11. Распределение расхода пара с различными приведенными скоростями на ПДЛ для рассматриваемых вариантов схемы перфорации.

а – ПДЛ-1; б – ПДЛ-2; в – ПДЛ-3.

Приведенная скорость пара: 1 – $j_g \leq 0.3$ м/с; 2 – $0.3 < j_g < 0.4$ м/с; 3 – $0.4 \leq j_g < 0.5$ м/с; 4 – $j_g \geq 0.5$ м/с

ПДЛ на рис. 11 показано распределение по долям расхода пара, имеющего разные скорости на выходе из ПДЛ. Известно, что приведенная скорость пара j_g на ПДЛ ПГВ-1500 составляет 0.28 м/с, поэтому на рис. 11 приведена доля расхода пара с $j_g < 0.3$ м/с. Достижение полного выравнивания паровой нагрузки происходит, если доля расхода пара с $j_g < 0.3$ м/с стремится к 100%. Кроме того, необходимо не допускать образования локальных зон с повышенной скоростью пара. С учетом этого на рис. 11 показаны также доли расхода пара с приведенными скоростями больше 0.3 м/с в нескольких диапазонах.

Доли расхода пара со скоростью меньше 0.3 м/с для вариантов ПДЛ-1 и ПДЛ-2 почти одинаковы и составляют 37 и 37.1% соответственно. При этом доли расхода с приведенной скоростью в диапазонах $0.4 \leq j_g < 0.5$ м/с и $j_g > 0.5$ м/с, составляют

соответственно 13.1 и 3.9% для ПДЛ-1 и 5.56 и 0.30% для ПДЛ-2. Таким образом, для ПДЛ-2 локальных высокоскоростных паровых зон образуется меньше, этот вариант ПДЛ более предпочтителен по сравнению с ПДЛ-1.

Вариант ПДЛ-3 заметно улучшает выравнивание паровой нагрузки. Для ПДЛ-3 доля расхода пара, имеющего малую скорость $j_g \leq 0.3$ м/с, в 1.74 раза больше, чем для других вариантов; доля расхода с более высокими скоростями ($0.4 \leq j_g < 0.5$) м/с составляет только 1.1%, и совсем отсутствуют скорости $j_g > 0.5$ м/с.

Помимо ПДЛ с переменной перфорацией в ряде случаев необходимо применять также потолочный пароприемный лист с переменной перфорацией.

На неравномерность течения пара в паровом пространстве существенное влияние оказывает

расположение патрубков отвода пара. В парогенераторе ПГВ-1000М использовались десять равномерно распределенных по верхней поверхности корпуса пароотводящих патрубков, что обеспечивало достаточно равномерный отвод пара вдоль ПГ, и пароприемный дырчатый лист с равномерной перфорацией. Однако в парогенераторе ПГВ-1500 в результате оптимизации компоновочных решений, упрощения конструкции и снижения стоимости узла отвода пара из парогенератора вместо десяти устанавливаются два патрубка диаметром 0.62 м. Необходимо учитывать, что уменьшение количества патрубков приводит к увеличению неравномерности отвода пара из ПГ, появлению больших продольных скоростей пара и вследствие этого – к ухудшению сепарационных характеристик парогенератора.

В [13–17] было выполнено расчетно-экспериментальное обоснование системы отвода пара из парогенератора ПГВ-1500 двумя патрубками. Использовалась приближенная методика расчета, базирующаяся на результатах испытаний дырчатых щитов котельных барабанов, но окончательная оптимизация профиля переменной перфорации ППДЛ была проведена по результатам испытаний на специально изготовленном аэродинамическом стенде, моделирующем паровое пространство ПГВ-1500. Весьма существенным предположением при получении оптимального профиля перфорации ППДЛ являлось равномерное распределение паровой нагрузки на зеркале испарения, которое должно быть обеспечено благодаря применению переменной перфорации ПДЛ. В заключение авторы подчеркивают, что окончательную проверку эффективности предложенной сепарационной системы парогенератора ПГВ-1500 по обеспечению проектного значения влажности пара при разных режимах работы необходимо выполнить при сепарационных испытаниях натурального ПГ.

Как указывалось ранее, в парогенераторе ПГВ-1000МКО (ВВЭР-ТОИ) отвод пара предусматривается через один патрубок. Очевидно, что такая схема отвода пара может привести к формированию неравномерного поля скорости пара в сепарационном объеме между зеркалом испарения и ППДЛ, которое обусловлено движением пара по пути наименьшего сопротивления, и может вызвать сверхнормативный унос влаги из ПГ при соблюдении остальных эксплуатационных параметров. Для обеспечения требуемых сепарационных характеристик по влажности горизонтального парогенератора с одним паровым патрубком необходимо сформировать равномерное поле вертикальной составляющей вектора скорости пара в сепарационном объеме с ограничением потерь давления в паровом тракте ПГ до проектного значения. С этой целью в [11, 12] было пред-

ложено создать неравномерное сопротивление на пути движения пара от зеркала испарения к паропроводу с помощью ППДЛ с переменной степенью перфорации.

Для определения необходимой степени перфорации выполнен комплекс оптимизационных расчетов конструкции ППДЛ парогенератора ПГВ-1000МКО с применением CFD-кода STAR CCM+. Моделировалось течение пара в паровом объеме ПГ с заданным распределением паровой нагрузки на зеркале испарения. Сеточная модель учитывает все конструктивные особенности парового объема и включает в себя 230 млн ячеек. Оптимизация степени перфорации ППДЛ проводилась на основе минимизации функционала, представляющего собой отношение интеграла по поверхности ППДЛ разности между средним расходом пара через ППДЛ и локальным расходом пара к общему расходу пара через ППДЛ. По результатам оптимизационных расчетов была определена переменная степень перфорации ППДЛ с одним паровым патрубком, позволившая снизить неравномерность удельных расходов пара через пластины ППДЛ и долю расхода пара (с вертикальной составляющей вектора скорости больше 0.7 м/с) в сепарационном объеме до значений, характерных для пароприемного устройства с десятью паровыми патрубками. Однако полученная авторами конкретная схема переменной перфорации ППДЛ в работах [11, 12] не раскрывается, что затрудняет полноценный анализ результатов.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Многолетний опыт эксплуатации показал достаточно высокую надежность горизонтальных парогенераторов, кроме того, они обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с ПГ других типов. Конструкция горизонтальных ПГ в ходе эксплуатации была существенно модернизирована и улучшена.

2. Сепарационная схема горизонтального ПГ основана на осадительной (гравитационной) сепарации влажного пара с использованием погруженного и пароприемного дырчатых листов для выравнивания скорости пара в паровом объеме, чтобы обеспечить требуемую влажность пара. Вследствие повышения мощности горизонтальных ПГ и уменьшения числа пароотводящих патрубков усиливается неравномерность паровой нагрузки на зеркале испарения и течения пара в паровом объеме, что требует совершенствования конструкций ПДЛ и ППДЛ путем перехода от равномерной степени перфорации листов, которая использовалась на ПГВ-1000М, к переменной степени перфорации, потенциально обладающей большей выравнивающей способностью.

3. Было реализовано несколько экспериментальных программ по исследованию теплогидравлических процессов в горизонтальном ПГ. Выполненные экспериментальные исследования внесли существенный вклад в понимание теплогидравлических процессов, протекающих в горизонтальных ПГ. Однако основная ценность созданной базы опытных данных состоит в возможности использовать ее для валидации расчетных кодов, моделирующих теплогидравлику горизонтальных ПГ.

4. Расчетный код STEG был специально разработан для моделирования горизонтального ПГ, прошел валидацию на всех доступных на сегодняшний день экспериментальных данных, применялся для анализа теплогидравлических процессов в натуральных горизонтальных ПГ. В целом код STEG адекватно воспроизводит теплогидравлические процессы в горизонтальном ПГ.

НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несмотря на достаточно высокий достигнутый уровень знаний о теплогидравлических процессах в горизонтальном ПГ, для совершенствования сепарационной схемы горизонтального ПГ требуется продолжение как экспериментальных, так и расчетных исследований.

Создание трехмерной экспериментальной установки

Все созданные экспериментальные модели представляли собой двумерную поперечную вырезку горизонтального ПГ, движение двухфазной среды происходило только в двух направлениях — по высоте и ширине рабочего участка, а течение вдоль продольной оси не моделировалось. Тем не менее, натуральный ПГ представляет собой существенно трехмерный объект, в котором реализуются перетоки пароводяной среды по всем трем направлениям. Целесообразно создать экспериментальную 3D-модель горизонтального ПГ, в которой были бы не только “горячая” и “холодная” половины, как на современных стендах, но и “горячий” и “холодный” торцы, как в натурном ПГ.

Создание базы данных по теплогидравлике ПДЛ переменной перфорации

На установке ПГВ (или ее аналоге) необходимо провести испытания большего числа вариантов ПДЛ с переменной степенью перфорации. Пока что были выполнены эксперименты только с одним ПДЛ с переменной степенью перфорации — 4.1% на “горячей” стороне и 8.3% на “холодной”. Следует использовать разбиение ПДЛ не только на две половины с разной степенью пер-

форации, но и на три или четыре части, каждая из которых будет иметь свою степень перфорации. В ходе проведения экспериментов необходимо обеспечить измерение влажности выходящего пара.

Экспериментальное исследование сепарации

Целесообразно провести исследования течения двухфазной смеси ниже и выше погруженного дырчатого листа на водовоздушном стенде с прозрачными стенками для возможности видеофиксации формирования газовых пузырей в барботажном слое над ПДЛ и выноса капель с поверхности зеркала испарения. Это необходимо для создания модели гравитационной сепарации “из первых принципов”, в которой ключевую роль играют частота образования водяных структур (капель, струй, лигаментов и т.п.) на поверхности зеркала испарения, их размер и начальная скорость.

Разработка модели сепарации

Необходимо усовершенствовать код STEG в части разработки и внедрения в код модели гравитационной сепарации. Следует провести валидацию кода на максимально возможном количестве экспериментальных данных, относящихся к гидродинамике горизонтального ПГ. Нужно провести сопряжение кода STEG с кодом класса CFD (например, OpenFOAM) для более точного моделирования течения влажного пара в паровом объеме ПГ.

Разработка модели переноса и распределения растворимых и нерастворимых примесей

Совершенствование расчетных кодов также должно быть направлено на моделирование распределения растворимых примесей в котловой воде ПГ и влияние на него внутрикорпусных устройств, таких как перегородки над и под ПДЛ, закраин и отверстий в них, дополнительных погруженных дырчатых листов, раздаточных коллекторов основной питательной воды. Все перечисленные внутрикорпусные устройства оказывают влияние на распределение растворимых и нерастворимых примесей в объеме котловой воды ПГ и существенно влияют на состояние трубных пучков и зон их вальцовки в коллекторах I контура ПГ. Прогнозирование влияния конструкции внутрикорпусных устройств ПГ на содержание растворимых и нерастворимых примесей в объеме котловой воды в ПГ с помощью расчетных оценок даст возможность провести оптимизацию конструкции внутрикорпусных устройств, что будет являться важным фактором повышения эксплуатационной надежности и срока службы парогенераторов. Расчетные оцен-

ки будут валидированы на результатах теплохимических испытаний на парогенераторах, что, в конечном итоге, позволит сделать расчетные коды значимым средством совершенствования конструкции парогенераторов.

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. **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.
4. **Бергункер В.Д.** Целостность теплообменных труб вертикальных и горизонтальных парогенераторов // Теплоэнергетика. 2011. № 3. С. 47–53.
5. **Егоров М.Ю.** Вертикальные парогенераторы для АЭС с ВВЭР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 3. С. 88–99.
6. **Russian and foreign steam generators for NPP power units with wet steam turbines** / М. Egorov, I. Kasatkin, I. Kovalenko, I. Krestunova, N. Lavrovskaya, N. Litvinova // E3S Web Conf. 2020. V. 178. P. 01007.
7. **Парогенераторы** реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б.И. Лукасевич, Н.Б. Трунов, Ю.Г. Драгунов, С.Е. Давиденко. М.: Академкнига, 2004.
8. **Экспериментальное обоснование, испытания и внедрение** новой сепарационной схемы на парогенераторах блоков АЭС с ВВЭР-1000 / Б.И. Нигматулин, А.Г. Агеев, В.Н. Блинков, Р.В. Васильева, Б.М. Корольков, Ю.Г. Драгунов, Н.Б. Трунов, А.В. Некрасов, В.Ф. Илюшин // Электрические станции. 2003. № 3. С. 16–22.
9. **Исследование** гидродинамики парогенератора ПГВ-1000 / А.Г. Агеев, Р.В. Васильева, А.И. Дмитриев, Г.А. Таранков, В.Ф. Титов // Электрические станции. 1987. № 6. С. 19–23.
10. **Рыжов С.Б.** Реакторная установка для ВВЭР-ТОИ // Росэнергоатом. 2011. № 4. С. 8–10.
11. **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.
12. **Оптимизация** конструкции пароприемного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000МКО / В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, О.В. Кудрявцев, А.П. Скибин, В.В. Сотсков // Теплоэнергетика. 2020. № 8. С. 37–49. <https://doi.org/10.1134/S0040363620080093>
13. **Трунов Н.Б., Сотсков В.В., Левченко Ю.Д.** Усовершенствованная сепарационная система ПГВ-1500 // Тяжелое машиностроение. 2008. № 1. С. 8–13.
14. **Сотсков В.В.** Разработка и исследование модернизированной конструкции сепарационных устройств парогенератора для АЭС с ВВЭР повышенной мощности: дис. ... канд. техн. наук. Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2010.
15. **Оптимизация** перфорации пароприемного дырчатого листа ПГВ-1500 / Ю.А. Безруков, Л.С. Кабанова, В.В. Сотсков, Н.Б. Трунов, А.А. Боронин, А.Д. Ефанов, В.П. Колесник, Ю.Д. Левченко // Труды 4-й Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск, 23–26 мая 2005 г. Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2005.
16. **Оптимизация** перфорации пароприемного дырчатого листа ПГВ-1500 / Ю.А. Безруков, В.В. Сотсков, Н.Б. Трунов, А.Д. Ефанов, Ю.Д. Левченко // Труды 7-го Междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск, 3–5 октября 2006 г. Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2006.
17. **Оптимизация** пароприемного устройства парогенератора реакторной установки. Высокопроизводительные вычисления на страже качества конструирования оборудования реакторной установки / В.Ю. Волков, Л.А. Голибродо, А.А. Крутиков, А.Т. Нечаев, А.В. Николаева, Ю.Н. Надинский, А.П. Скибин, В.В. Сотсков // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности / под ред. В.А. Садовниченко, Г.И. Савина, Вл.В. Воеводина. М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 5–12.
18. **Галецкий Н.С., Гришаков В.И., Титов В.Ф.** Исследование работы парогенератора на АЭС // Теплоэнергетика. 1973. № 2. С. 2–5.
19. **Таранков Г.А., Свистунов Е.П., Голубев Б.П.** Исследование гидродинамики парового объема модели парогенератора ПГВ-1000 кондуктометрическим методом // Теплоэнергетика. 1982. № 7. С. 61–63.
20. **Сааков Э.С., Свистунов Е.П., Дементьев Б.А.** Использование электрозондирования для измерения действительного уровня воды в парогенераторе // Теплоэнергетика. 1982. № 5. С. 70–72.
21. **Дмитриев А.И., Козлов Ю.В., Баскин В.И.** Повышение точности измерения массового уровня в парогенераторах АЭС // Энергетик. 1986. № 1. С. 16–17.
22. **Свистунов Е.П.** Исследование реального парораспределения в парогенераторе реакторной установки ВВЭР-1000 // Энергомашиностроение. 1986. № 5. С. 32–35.
23. **Титов В.Ф., Таранков Г.А., Лукасевич Б.И.** Основные направления исследований и разработок парогенераторов горизонтального типа для АЭС с ВВЭР // Энергомашиностроение. 1986. № 5. С. 27–29.
24. **Исследования** парогенераторов головного блока АЭС с ВВЭР-1000 / Г.А. Таранков, В.Ф. Титов, С.А. Логвинов, Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов, В.Ю. Пикус, А.И. Дмитриев, Н.С. Галецкий, В.Ф. Илюшин, Ю.К. Ситник // Энергомашиностроение. 1986. № 5. С. 30–32.
25. **Свистунов Е.П., Таранков Г.А.** Влияние конструкции ПДЛ на парораспределение // Энергомашиностроение. 1987. № 1. С. 15–19.
26. **О концентрации** растворимых примесей в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000 / Д.Ф. Гуцев,

- Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов, В.Ф. Титов, Г.А. Таранков // Теплоэнергетика. 1987. № 12. С. 54–57.
27. **Горизонтальные** парогенераторы для АЭС с ВВЭР / Т.Х. Маргулова, В.Ф. Титов, Г.А. Таранков, Н.Б. Трунов // Теплоэнергетика. 1988. № 5. С. 12–14.
 28. **Особенности** гидродинамики парогенератора ПГВ-1000 без погруженного дырчатого листа / Д.Ф. Гуцев, Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов, В.Ф. Титов, Ю.А. Соловьев, Г.А. Таранков // Теплоэнергетика. 1988. № 8. С. 44–48.
 29. **Некрасов А.В., Корольков Б.М., Козлов Ю.В.** Исследование температурного режима поверхности теплообмена парогенератора серийного блока ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. 1988. № 12. С. 10–14.
 30. **Корольков Б.М., Данц В.Г., Некрасов А.В.** Исследование паросодержания в водяном объеме парогенераторов ПГВ-1000 гидростатическим методом // Теплогидродинамические процессы в элементах энергооборудования электростанций: Сб. науч. тр. М.: ЭНИН, 1988. С. 21–30.
 31. **Агеев А.Г., Васильева Р.В., Дмитриев А.И.** Исследования новой сепарационной схемы для парогенератора ПГВ-1000 // Атомная энергия. 1989. Т. 67. Вып. 3. С. 178–180.
 32. **Циркуляция** воды в парогенераторе ПГВ-1000 / В.Ф. Титов, Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов, Г.А. Таранков, Н.Б. Эскин, Н.Б. Трунов // Теплоэнергетика. 1990. № 7. С. 54–58.
 33. **Агеев А.Г., Корольков Б.М., Данц В.Г.** Исследование сепарационных и гидродинамических характеристик парогенератора серийного блока АЭС с ВВЭР-1000 // Электрические станции. 1990. № 1. С. 29–33.
 34. **Свиштунов Е.П., Козлов Ю.В., Таранков Г.А.** Модернизация систем водопитания и продувки парогенераторов ПГВ-1000 // Энергетика и электрификация. Сер.: Атомные электростанции. Отечественный производственный опыт. 1991. Вып. 6. С. 8–13.
 35. **Козлов Ю.В., Свиштунов Е.П., Таранков Г.А.** Исследования распределения солей в водяном объеме парогенератора ПГВ-1000 с модернизированными системами раздачи питательной воды и продувки // Электрические станции. 1991. № 9. С. 30–32.
 36. **Свиштунов Е.П., Таранков Г.А., Козлов Ю.В.** Особенности изменения паросодержания в водяном объеме и уровня воды в парогенераторе ПГВ-1000М // Электрические станции. 1992. № 1. С. 32–36.
 37. **Исследование** выравнивающей способности погруженного дырчатого листа парогенератора ПГВ-1000 / Э.С. Сааков, Е.П. Свиштунов, В.Ю. Пикус, А.В. Некрасов, В.П. Севастьянов, В.Л. Мухачев, Г.А. Таранков, В.П. Молчанов // Теплоэнергетика. 1992. № 7. С. 50–55.
 38. **Молчанов В.Л., Усанов А.И., Ситник Ю.К.** Некоторые закономерности процессов теплообмена и гидродинамики при глубоком снижении уровня воды в парогенераторе ПГВ-1000 // Электрические станции. 1993. № 2. С. 15–21.
 39. **Титов В.Ф., Козлов Ю.В., Корольков Б.М.** Особенности гидродинамики водяного объема парогенератора ПГВ-1000М // Электрические станции. 1993. № 9. С. 25–30.
 40. **Титов В.Ф.** Парогенераторы энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 // Атомная энергия. 1994. Т. 77. Вып. 2. С. 100–107.
 41. **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.
 42. **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.
 43. **Колбасников А.В.** Разработка методов расчета гидродинамики двухфазной среды и теплообмена в поперечноомываемых поверхностях нагрева парогенераторов на основе экспериментальных исследований: дис. ... канд. техн. наук. ОАО ВТИ, 2000.
 44. **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/10.1016/j.nucengdes.2022.112048>**
 45. **Валидация** кода STEG на экспериментальных данных по гидродинамике горизонтального парогенератора / Х. Абди, Н. Урегани Джафари, В.И. Мелихов, О.И. Мелихов // Теплоэнергетика. 2024. № 5. С. 32–44. <https://doi.org/10.56304/S0040363624050011>
 46. **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.
 47. **Модель** для исследования теплогидравлики горизонтальных парогенераторов, исходные задачи и цели / Н.Б. Трунов, А.И. Фильчуков, Ю.К. Ситник, А.А. Казанцев, В.В. Сергеев // Труды 7-го Междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам. Подольск: ОКБ “Гидропресс”, 2006.
 48. **Simulation of the thermal hydraulic processes in the horizontal steam generator with the use of the different interfacial friction correlations / V. Melikhov, O. Melikhov, Yu. Parfenov, A. Nerovnov // Sci. Technol. Nucl. Install. 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/181393>**
 49. **Abdi H., Ouregani N.J., Melikhov O.I.** Validation of the STEG code on experimental data obtained on the PGV-1500 model // Proc. of the 6th Intern. Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, (REEPE). Moscow, Russia; Cairo, Egypt; Sharjah, UAE, 29 Febr. – 2 March 2024.
 50. **Экспериментальные** исследования гидросопротивления и выравнивающей способности ПДЛ на стенде ПГВ (ЭНИЦ) / О.И. Мелихов, И.В. Елкин, В.И. Мелихов, С.М. Никонов, Ю.В. Парфенов, Д.А. Емельянов, А.А. Неровнов // Сб. трудов

- 9-й Междунар. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Россия, Подольск, 19–22 мая 2015 г. CD.
51. **Влияние** неравномерной перфорации погруженно-дырчатого листа на выравнивание паровой нагрузки на зеркале испарения парогенератора ВВЭР / 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. 2016. № 1. С. 54–58. <https://doi.org/10.1134/S0040363615120036>
 52. **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>
 53. **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>
 54. **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>
 55. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nigmatulin B.I.** Numerical modeling of secondary side thermal hydraulics of horizontal steam generator // Proc. of the 3rd Intern. Seminar on Horizontal Steam Generators. Lappeenranta, Finland, 1995 P. 249–270.
 56. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nigmatulin B.I.** Mathematical modelling of horizontal steam generator // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Multiphase Flow. Kyoto, Japan, 3–7 Apr. 1995. V. 4. P. P8-9–P8-15.
 57. **Melikhov V.I., Melikhov O.I., Nigmatulin B.I.** Thermal-hydraulic analysis of horizontal steam generator // Proc. of the 1st Intern. Symp. on Two-Phase Flow Modelling and Experimentation. Rome, Italy, 9–11 Oct. 1995. V. 1. P. 511–518.
 58. **Stosic Z.V., Stevanovic V.D.** Advanced three-dimensional two-fluid porous media method for transient two-phase flow thermal-hydraulics in complex geometries // Num. Heat Transfer. Part B: Fundamentals. 2002. V. 41. Is. 3–4. P. 263–289. <https://doi.org/10.1080/104077902753541014>
 59. **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. Arlington, Virdzhiniya, USA, 14–18 Apr. 2002. ICONE10-22451.
 60. **Numerical** simulation and analyses of the loss of feed water transient at the Unit 4 of KOLA NPP / V.D. Stevanovic, Z.V. Stosic, M. Kiera, U. Stoll // Proc. of the 10th Intern. Conf. on Nuclear Engineering, Arlington, Virdzhiniya, USA, 14–18 Apr. 2002. ICONE10-22452.
 61. **3D transient** calculations of PGV-1000 based on TRAC / A.A. Kazantsev, A.N. Pozdnyakov, V.V. Sergeev, V.A. Evstifeev // Proc. of the 11th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-11). Avignon, France, 2–6 Oct. 2005. Paper 329.
 62. **TRAC-PF1/MOD2.** Theory Manual / J.W. Spore, S.J. Jolly-Woodruff, T.K. Knight, J.C. Lin, R.A. Nelson, K.O. Pasamehmetoglu, R.G. Steinke, C. Unal // LA-12031-M. 1993. V. I. NUREG/CR-5673. USA.
 63. **Крошили А.Е., Крошили В.Е., Смирнов А.В.** Численное исследование трехмерных течений пароводяной смеси в объеме парогенератора ПГВ-1000 // Теплоэнергетика. 2008. Т. 55. С. 372–379.
 64. **Комплекс** программ БАГИРА для моделирования теплогидродинамики многофазных сред / А.Н. Веселовский, А.Ф. Животягин, С.Д. Калинин, А.Е. Крошили, В.Е. Крошили // Теплоэнергетика. 1998. № 5. С. 11–16.
 65. **Semi 2D** modeling of the horizontal steam generator PGV-1000 using the RELAP5 code / E. Zarifi, G.R. Jahanfarnia, S.K. Mousavian, F. D’Auria // Prog. Nucl. Energy. 2009. V. 51. Is. 8. P. 788–798. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2009.05.001>
 66. **RELAP5/Mod3.3** Code Manual. Models and Correlations. NUREG/CR-5535. 2001. V. IV. <https://www.nrc.gov/docs/ML1103/ML110330271.pdf>.
 67. **Hovi V., Ivonen M.** PORFLO simulations of Loviisa horizontal steam generator: Res. Report. No. VTT-R-01406-10. 18.02.2010.
 68. **Fluent 6.3** User’s Guide. Lebanon. NH. Fluent Inc., 2006.
 69. **Study** of perforated plate effect in horizontal WWER-1000 steam generator / A. Safavi, M.R. Abdi, M. Aghaie, M.H. Esteki, A. Zolfaghair, A.F. Pilevar, A. Daryabak // Nucl. Eng. Des. 2013. V. 256. P. 249–255. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.12.010>
 70. **ANSYS CFX** User Manual, Release 12.1. ANSYS Inc., 2009.
 71. **Ishii M., Zuber N.** Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows // AIChE J. 1979. Is. 5. P. 843–855. <https://doi.org/10.1002/aic.690250513>
 72. **Ghazanfari V., Ansarifar G.R., Esteki M.H.** Drift flux modeling of the VVER-1000 horizontal nuclear steam generator // Prog. Nucl. Energy. 2014. V. 76. P. 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.04.021>
 73. **Zuber N., Findlay J.A.** Average volumetric concentration in two-phase flow systems // J. Heat Transfer. 1965. V. 87. P. 453–540. <https://doi.org/10.1115/1.3689137>
 74. **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>
 75. **Rabiee A., Kamalinia A.H., Haddad K.** Two-phase flow field simulation of horizontal steam generators // Nucl. Eng. Technol. 2017. V. 49. Is. 1. P. 92–102. <https://doi.org/10.1016/j.net.2016.08.008>
 76. **Simovic Z.R., Ocokoljic S., Stefanovic V.D.** Interfacial friction correlations for the two-phase flow across tube bundles // Int. J. Multiphase Flow. 2007. V. 33.

- Is. 2. P. 217–226.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.08.003>
77. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
78. **Нигматулин Р.И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
79. **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>
80. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Ле Т.Т.** Экспериментально-расчетные исследования гидродинамических процессов в горизонтальном парогенераторе. М.: Наука, 2022.
81. **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>

Horizontal Steam Generators: Design Improvement and Experimental-and-Computational Studies (Review)

**V. N. Blinkov^a, A. V. Dedov^b, I. V. Elkin^{c, d}, V. I. Melikhov^{b, c, *},
 O. I. Melikhov^{b, c}, S. M. Nikonov^{b, c}, and A. S. Nikulin^b**

^a AO Rosenergoatom Concern, Moscow, 115191 Russia

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

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

^d National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: MelikhovVI@mpei.ru

Abstract—A review is presented of designs of horizontal steam generators (SG) for nuclear power plants (NPP) with water-moderated water-cooled reactors (VVERs) and of experimental-and-computational studies of thermohydraulic processes running in them. Horizontal SGs are examined from the first commercial design of the PGV-440 SG and the most widely used today PGV-1000M SG to the steam generators developed for the new generation reactor units of types VVER-1200 and VVER-TOI as well as for the high-power VVER-1500 reactor. A comparative analysis was carried out of the experimental facilities developed for the investigation of thermohydraulic processes occurring in a horizontal steam generator. Each of the examined experimental facilities has limitation related to the capabilities for the simulation of a full-scale SG caused by either geometric characteristics or thermohydraulic conditions. Nevertheless, it has been demonstrated that we have at present a sufficiently large experimental database suitable for validating computational codes simulating thermohydraulic characteristics of a horizontal steam generator. A review of the available computational codes is presented. The STEG code in which the two-phase flow is described by multifluid models is examined in more detail. The validation of the STEG code against experimental data on void fraction, pressure drop, and water velocity demonstrated high accuracy of the predictions. One of the problems to be solved in designing horizontal steam generators for new generation reactor units is the improvement of the equalization ability of the submerged and steam-receiving perforated sheets due to the enhanced nonuniformity of the steam load on the evaporation surface and of the steam flow in the steam space. The results are presented of the experimental-and-computational investigation of the equalization ability of perforated sheets, which corroborate the possibility of its improvement by application of a variable perforation ratio. The areas of further experimental investigations into thermohydraulic processes in a horizontal steam generator and ideas for improving the computational codes are formulated.

Keywords: horizontal steam generator, thermohydraulic processes, experiment, simulation, computational code