

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.181

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПРОЦЕССА СЕПАРАЦИИ ВЛАЖНОГО ПАРА В ПАРОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000М

В.А. ГОРБУНОВ, Н.А. ЛОНШАКОВ, М.Н. МЕЧТАЕВА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail:gorbynov.w@mail.ru, nik-lon@mail.ru, maria.mechtaeva@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время актуальным является вопрос снижения влажности пара на выходе из парогенераторов. Величина влажности напрямую влияет на безопасность и эффективность работы электростанций. Оптимизация конструкции парогенератора улучшит его сепарационные свойства и снизит влажность пара. Создание численной модели процесса сепарации влажного пара в натурном парогенераторе и ее верификация позволят перейти к оптимизации конструкции парогенератора и оценке эффективности полученной модели. Целью данного исследования является предварительное исследование процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М.

Материалы и методы. Для исследования сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М в системе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent разработана численная модель и приняты следующие допущения: поверхность зеркала испарения ровная; капли имеют сферическую форму, не оказывают влияния на движение пара, не взаимодействуют друг с другом; распада капель не происходит.

Результаты. Получена трехмерная модель парового пространства парогенератора ПГВ-1000М, позволяющая рассматривать процессы сепарации влажного пара. Анализ результатов проведенного исследования показывает, что характер протекающих в модели процессов соответствует теоретическим выкладкам и эксплуатационным данным. Проведена верификация полученной модели, после которой она может быть применена для целей оптимизации конструкции парогенератора.

Выводы. Дальнейшие численные исследования разработанной модели помогут определить наиболее оптимальную конструкцию парогенератора, обеспечивающую наивысшую эффективность сепарации пара. Кроме того, возможно и перспективно изучение влияния поверхности зеркала испарения на влажность пара в паровом объеме парогенератора. Снижение влажности пара на выходе из парогенератора существующих и проектируемых электростанций обеспечит значительную экономию средств, затрачиваемых на ремонт лопаточного аппарата паровой турбины, и приведет к повышению тепловой эффективности станции.

Ключевые слова: парогенератор, сепарация пара, гравитационная сепарация, трехмерная численная модель, зеркало испарения, пароприемный дырчатый лист

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE WET STEAM SEPARATION IN THE STEAM SPACE OF PGV-1000M STEAM GENERATOR

V.A. GORBUNOV, N.A. LONSHAKOV, M.N. MECHTAEVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail:gorbynov.w@mail.ru, nik-lon@mail.ru, maria.mechtaeva@mail.ru

Abstract

Background. The issue of reducing steam humidity at the output of steam generator is relevant. The value of humidity directly affects the safety and efficiency of power plants. The optimization of steam generator design will enable to enhance its separation properties and reduce steam humidity. Creating a numerical model of wet steam separation process in a full-scale steam generator and its verification will allow proceeding to optimize the steam generator design and evaluate the model effectiveness. This article presents a preliminary study of the wet steam separation process in the steam space of PGV-1000M steam generator.

Materials and methods. To study the wet steam separation process in the steam space of PGV-1000M steam generator, a numerical model was developed in the ANSYS Fluent finite element analysis system. The following assumptions were made: the surface of the evaporation mirror is flat, drops have a spherical shape, they do not affect the movement of steam, they do not interact with each other, and there is no decay of the droplets.

Results. A three-dimensional model of the steam space of PGV-1000M steam generator which allows considering the processes of wet steam separation has been obtained. The analysis of the results has shown that the nature of the processes occurring in the model corresponds to theoretical calculations and operational data. The developed model has been verified and can be used to optimize the steam generator design.

Conclusions. Further numerical studies of the developed model will enable to determine the most optimal design of the steam generator which provides the highest efficiency of steam separation. Moreover, it is possible and promising to study the effect of the evaporation mirror surface on the steam humidity in the steam generator. Decreasing the steam humidity at the steam generator output at existing and projected power plants will provide significant savings in funds spent on repairing the steam turbine blade apparatus, and will lead to an increase in the thermal efficiency of the plant.

Key words: steam generator, steam separation, gravitational separation, three-dimensional numerical model, evaporation mirror, steam distribution perforated plate

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.3.005-015

Введение. Важнейшим элементом АЭС с реакторами с водой под давлением являются парогенераторы (ПГ), выдающие пар на турбогенератор для выработки электроэнергии. В ходе эксплуатации конструкция парогенераторов, по сравнению с проектной, претерпевала изменения и модификации. Процесс совершенствования парогенераторов, находящихся в эксплуатации, продолжается [1]¹.

Парогенератор представляет собой специальное теплообменное устройство, предназначенное для генерации рабочего пара необходимых параметров [2]. Рабочий пар производится из питательной воды парогенераторов, которая получает теплоту от теплоносителя реактора. Качество производимого пара является одним из основных показателей работы парогенератора. Ис-

следования, посвященные процессам генерации пара на АЭС и методам улучшения его качества [3–9], показывают, что увлажнение пара и унос примесей котловой воды при парообразовании представляют собой сложный комплекс процессов. Качество получаемого пара зависит от конструктивных особенностей парогенератора и его сепарирующих устройств, параметров состояния пара, водного режима, условий эксплуатации блока, уровня котловой воды (высоты парового пространства) и др. Среди контролируемых показателей качества пара одни свидетельствуют о чистоте самого пара, а другие (косвенно) – о чистоте конденсата.

Целесообразно нормировать влажность пара. Продукты коррозии находятся во влаге в крупно- или мелкодисперсном состоянии, их отложения более вероятны с увеличением концентрации продуктов коррозии в уносимой влаге и зависят от величины влажности насыщенного пара. Даже при незначительном уносе влаги ко-

¹ Отчет об опыте эксплуатации и совершенствовании парогенератора типа ПГВ-1000М: ОКБ Гидропресс. – 1998.

личество примесей, уносимых с потоками влажного пара, будет измеряться десятками килограммов в сутки. Отложение этих примесей на теплообменных поверхностях, в пароперегревателе и особенно в турбине приводит к повреждениям парогенератора, эрозии лопаток турбины и снижению ее внутреннего относительного КПД. Поэтому обеспечение низкой влажности пара на выходе из парогенератора является важной задачей в теплоэнергетике. Величина влажности нормируется и не должна превышать проектного значения 0,2 % по массе на выходе из парогенератора.

Анализ существующей конструкции ПГ показал, что большая неравномерность нагрузки зеркала испарения (рис. 1) представляет определенные технические трудности в получении пара заданной влажности. Для решения вопроса о выравнивании нагрузки был проведен большой комплекс опытно-конструкторских работ [7].

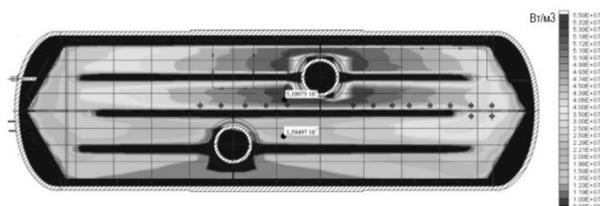


Рис. 1. Расчетная тепловая нагрузка ПГВ-1000М

Результаты исследований натуральных парогенераторов в период пусконаладочных работ [10]² показали, что общая картина циркуляции воды в ПГВ-1000М может быть представлена схемой, показанной на рис. 2.

Наиболее характерной особенностью работы ПГВ-1000М, даже при номинальной нагрузке, является выброс пароводяной смеси из горячего канала между корпусом и закраиной погруженного дырчатого листа, что отрицательно влияет на качество генерируемого пара [11].

В объеме ПГВ-1000М наблюдается комплекс гидродинамических процессов: меняющиеся режимы циркуляции рабочего тела; неравномерная раздача питательной воды; неравномерная паровая нагрузка по длине и ширине парогенератора; выброс

пароводяной смеси в середине парогенератора и слив значительной части воды в торцы, создающие обратное движение воды под погруженным дырчатым листом в нижней части пакетов по направлению к середине парогенератора. В результате качество генерируемого пара может непредсказуемо измениться в широких пределах, а это налагает особую ответственность на конструкцию сепарационных устройств³.

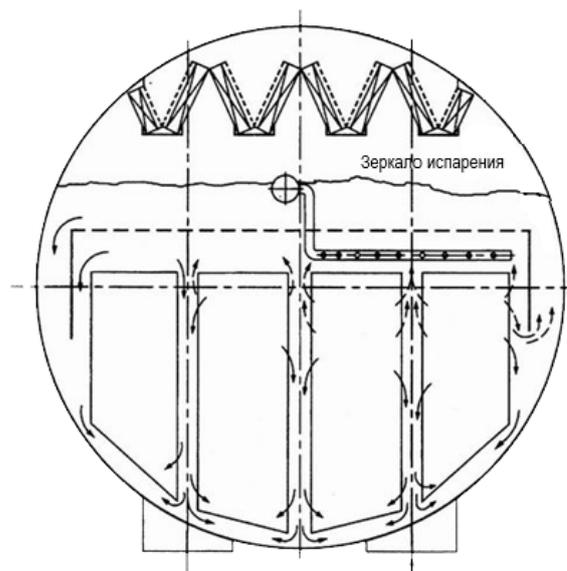


Рис. 2. Схема циркуляции котловой воды в объеме ПГВ-1000 М

Большинство исследований по модернизации и оптимизации конструкции парогенераторов носят опытно-экспериментальный характер, что связано со значительными финансовыми и временными затратами. Понятно, что такой метод невозможно применить для исследований и обоснования работоспособности парогенераторов современных атомных электрических станций, находящихся на стадии проектирования.

Исходя из всего вышеперечисленного, целесообразно сначала провести численное исследование работы существующего парогенератора. В случае подтверждения работоспособности модели, т.е. схожести результатов ее работы с эксплуатационными данными работы натурального парогенератора, возможно проведение расчетов и изменение данной модели в целях оптимиза-

² Трунов Н.Б. Повышение надежности и усовершенствование конструкции парогенераторов горизонтального типа для АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 125 с.

³ Петров А.Ю. Модернизация сепарационных устройств парогенераторов АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2005. – 108 с.

ции работы всего агрегата. Результаты таких расчетов помогут спрогнозировать эффективность сепарации пара в оптимизированном парогенераторе и оценить вынос капельной влаги за его пределы [6].

Ниже предлагается предварительное исследование с созданием в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS Fluent численной модели процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М [12]. В качестве объекта моделирования и дальнейшего исследования был взят парогенератор ПГВ-1000М, эксплуатируемый на 5 ЭБ Нововоронежской АЭС.

Созданная модель должна иметь следующие возможности:

- определение влияния гравитационной сепарации и скорости движения пара на содержание влаги в паровом потоке;
- построение зависимости влажности пара от высоты парового пространства парогенератора;
- оценка влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание поля скоростей в паровом объеме;
- визуализация траекторий потоков пара и капель влаги.

Методы исследования. В ходе проведения исследования по инженерным чертежам парогенератора была воспроизведена расчетная область⁴. Она включает в себя паровой объем парогенератора, ограниченный поверхностью зеркала испарения, расположенной на уровне 2550 мм, поверхностями «горячего» и «холодного» коллекторов, корпусом самого парогенератора, стенками пароотводящих патрубков и сечением парового коллектора (рис. 3). На входном граничном условии задан профиль паровой нагрузки для нормальных условий эксплуатации парогенератора. На выходе дан перепад давления парового пространства.

ANSYS для решения поставленной задачи применяет метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на некоторое количество малых, но конечных по размерам элементов (рис. 4), и для каждого элемента численным методом решаются дифференциальные уравнения с частными производными.

⁴ Парогенератор ПГВ-1000М. Чертеж общего вида. 320.05.01.00.000 ВО, ГКАЭ ОКБ «Гидропресс», 1979 г.

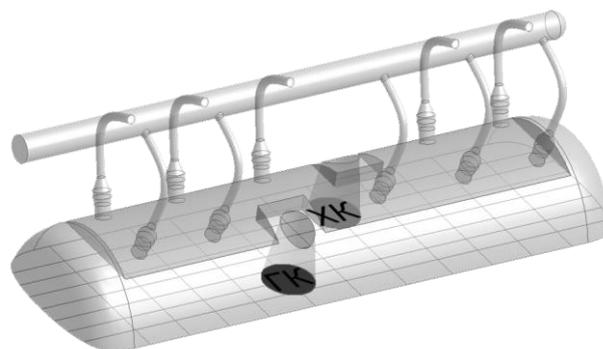


Рис. 3. Расчетная область модели парогенератора ПГВ-1000М

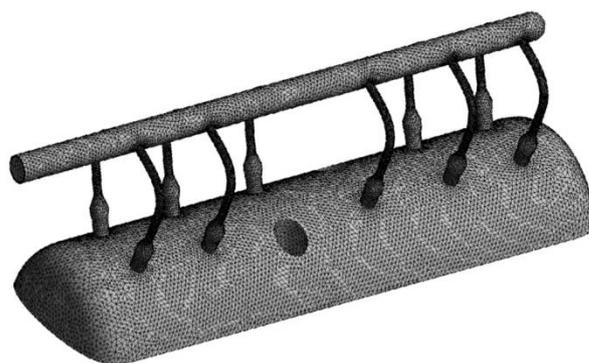


Рис. 4. Расчетная сетка модели парового пространства парогенератора

Поток пара смоделирован как сплошная среда при помощи решения уравнений Навье–Стокса:

$$\begin{cases}
 \rho \left(\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \\
 + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right] + \\
 + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right]; \\
 \rho \left(\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \\
 + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right] + \\
 + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right]; \\
 \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \\
 + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \\
 + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div}(u) \right) \right].
 \end{cases} \quad (1)$$

Вместе с уравнением неразрывности уравнения Навье–Стокса образуют замкнутую систему:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0.$$

Слагаемые левой части системы уравнений (1) определяют изменение свойств потока жидкости (газа) во времени и количество движения жидкой частицы. Слагаемые правой части уравнений определяют действие массовых сил, сил давления и сил вязкости. Таким образом, уравнения рассматриваются как баланс сил инерции (левая часть), массовых сил, сил давления и вязкости (правая часть), действующих на жидкую частицу.

Капли влаги с применением DPM (Discrete Phase Model) смоделированы как дискретная фаза в виде сферических частиц, рассеянных в непрерывной фазе парового потока. При помощи ANSYS Fluent вычислены траектории этих дискретных фазовых объектов, а также тепломассоперенос в/из них. Расчет дискретной фазовой траектории проведен в Лагранжевой формулировке, включающей дискретную фазовую инерцию, гидродинамическое сопротивление и силу тяжести, как для стационарных, так и для нестационарных течений.

Лагранжева дискретная фазовая модель в ANSYS Fluent следует подходу Эйлера–Лагранжа. Пар рассматривается как сплошная среда путем решения уравнений Навье–Стокса, в то время как дисперсная фаза решается путем отслеживания большого количества капель через расчетное поле потока. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой. Этот подход значительно упрощается, когда взаимодействиями каплей дискретной фазы между собой можно пренебречь.

Расчет траекторий полета капель проведен путем интегрирования баланса сил, действующих на каплю [13]. Этот баланс приравнивает инерцию капли к силам, действующим на нее, и может быть записан как

$$m_p \frac{d\vec{u}_p}{dt} = m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_p} + m_p \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F}, \quad (2)$$

где m_p – масса частицы (капли); \vec{u} – скорость газовой фазы; \vec{u}_p – скорость капли;

ρ_p, ρ – плотность капель и пара соответственно; \vec{F} – дополнительные силы; $m_p \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_p}$ – сила сопротивления; τ_p – время релаксации капли.

Время релаксации определяется как

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot \frac{24}{C_d Re},$$

где μ – молекулярная вязкость жидкости; d_p – диаметр капли; Re – число Рейнольдса; C_d – коэффициент сопротивления.

Число Рейнольдса определяется по формуле

$$Re = \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu}.$$

Для решения поставленной задачи принимались следующие допущения:

- поверхность зеркала испарения ровная;
- капли не оказывают влияния на движение пара;
- взаимодействием между каплями пренебрегается;
- капли имеют сферическую форму;
- распада капель не происходит.

Результаты исследования. В ходе проведенного предварительного исследования была разработана численная модель процесса сепарации влажного пара в паровом пространстве парогенератора ПГВ-1000М. Были получены и проанализированы следующие результаты:

- определено распределение абсолютного давления в паровом пространстве парогенератора;
- проведена оценка влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание скорости посредством представления распределения скоростей под листом и над ним;
- представлено распределение концентрации влаги по паровому объему парогенератора;
- визуализированы траектории потока генерируемого пара и капель влаги диаметром 10–500 мкм;

Ниже представлены результаты расчета поля абсолютного давления в паровом пространстве парогенератора (рис. 5) и скорости пара (рис. 6) в парогенераторе.

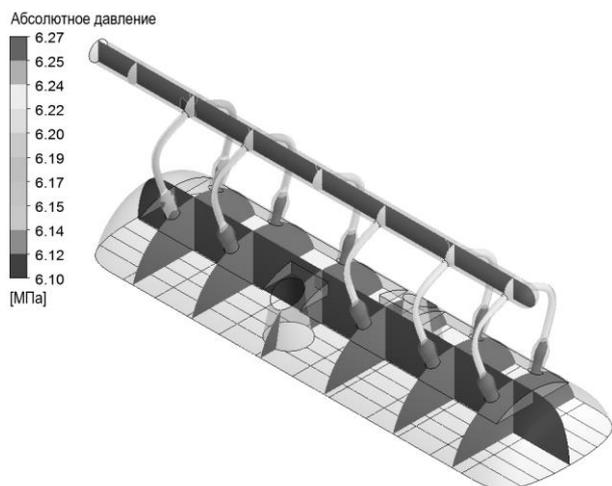


Рис. 5. Распределение абсолютного давления в паровом объеме парогенератора

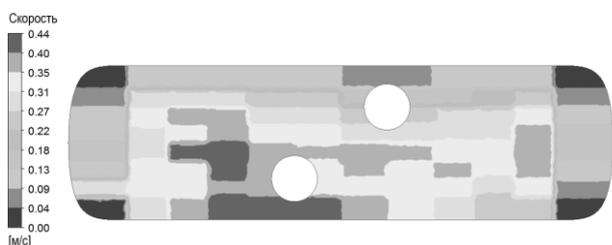


Рис. 6. Распределение скорости пара, выходящего с поверхности зеркала испарения

Скорости выхода пара с поверхности зеркала испарения преобладают в области горячего коллектора, что вполне логично. Наблюдается значительная неравномерность нагрузки зеркала испарения. В то же время скорости не превышают требуемого значения.

Оценку влияния пароприемного дырчатого листа на выравнивание скорости визуализируем посредством представления распределения скоростей под листом и над ним (рис. 7). Визуальная оценка представленных результатов говорит о необходимости переменной перфорации пароприемного дырчатого листа для более равномерной подачи пара в паропровод.

Результат визуализации траектории потока пара представлен на рис. 8. Анализ результатов расчета определяет некоторые особенности течения пара в паровом объеме парогенератора:

1) вихревое движение пара в пристеночной области пароприемного дырчатого листа и эллиптических обечаек;

2) вихревое движение пара в зоне коллекторов теплоносителя первого контура и стенок пароприемного дырчатого листа;

3) закручивание потока пара в шарообразной области паропровода;

4) закручивание потока на входе в коллекторы отбора пара.

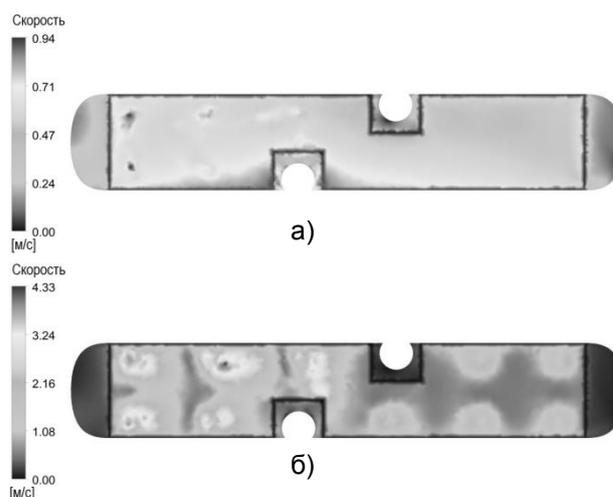


Рис. 7. Распределение скорости: а – под пароприемным дырчатым листом; б – над пароприемным дырчатым листом

Теоретические и экспериментальные работы, посвященные проблемам капельного уноса, показывают, что жидкость транспортируется потоком пара лишь в том случае, если она подвергалась дроблению на достаточно мелкие фракции [3, 5–9].

При нормальных условиях работы парогенератора уносятся относительно мелкие капли. Однако с повышением нагрузки котла, т.е. с увеличением скорости подъема пара, уносятся и более крупные капли. Сам процесс образования капель в барабане условно определяется двумя факторами: в результате дробления пароводяных струй и вследствие разрыва оболочек паровых пузырей.

Отмечается сложность гидродинамики горизонтальных парогенераторов энергоблоков атомных электрических станций с ВВЭР. Мелкие капли образуются путем дробления пароводяных струй при ударе о перегородки, стенки барабана, у «горячего» коллектора и т.д. Однако при снижении нагрузки котла вероятность образования таких капель резко уменьшается. При малых нагрузках зеркала испарения являются основным источником мелких капель [14].



Рис. 8. Траектория потока пара в паровом объеме парогенератора

По мере повышения нагрузки (т.е. увеличения подъемной скорости пара) увеличивается и унос капель, оторвавшихся от зеркала испарения. Чем больше давление пара в барабане, чем больше скорость его подъема и чем меньше диаметр капли, тем больше высота подъема. Чем

меньше диаметр капли, тем больше высота подъема капель за счет воздействия потока пара на нее [3, 14].

Полученные в результате расчетов траектории капель влаги представлены на рис. 9–11 на примере капель диаметром 50, 200, 400 мкм.

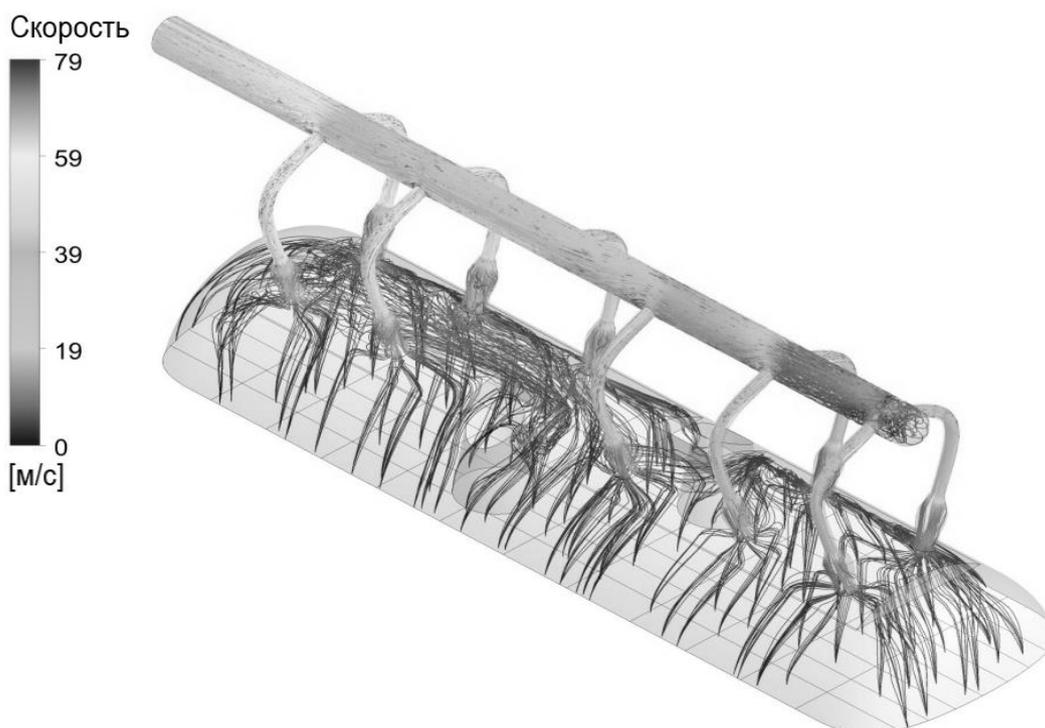


Рис. 9. Траектории частиц диаметром 50 мкм

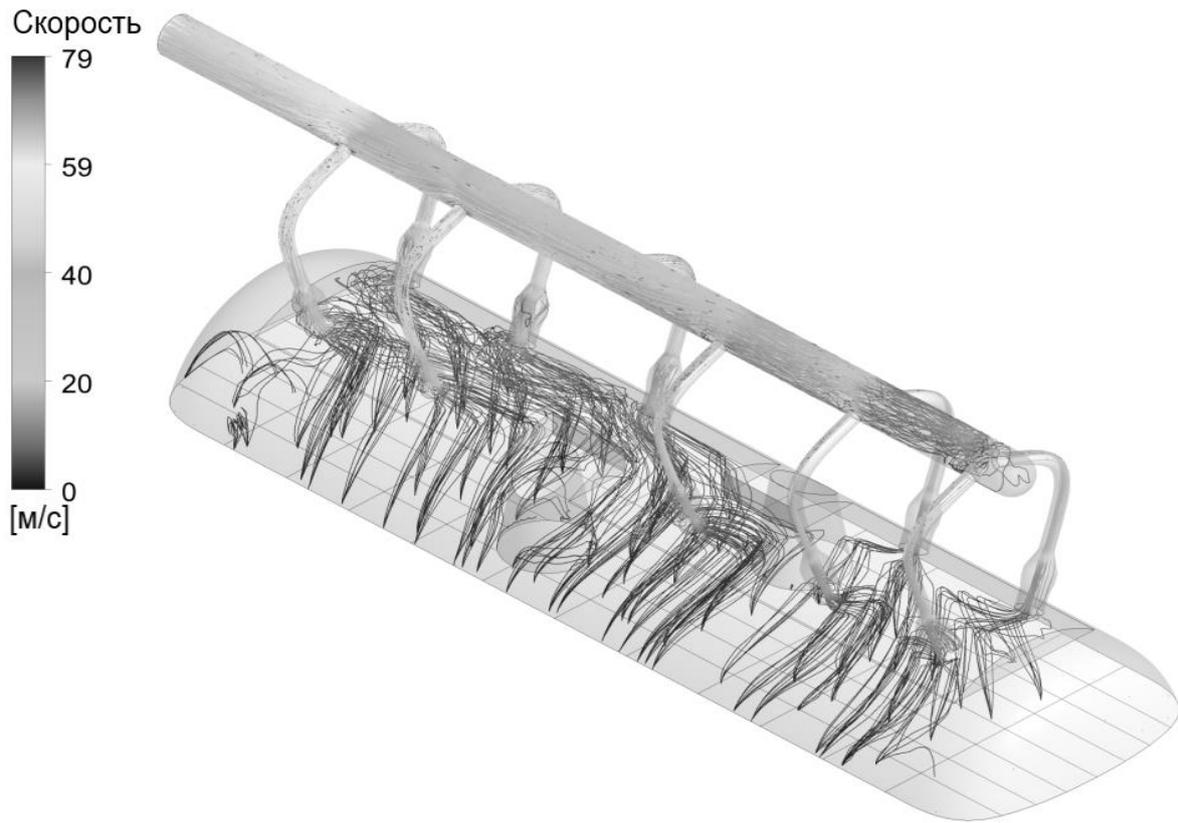


Рис. 10. Траектории частиц диаметром 200 мкм

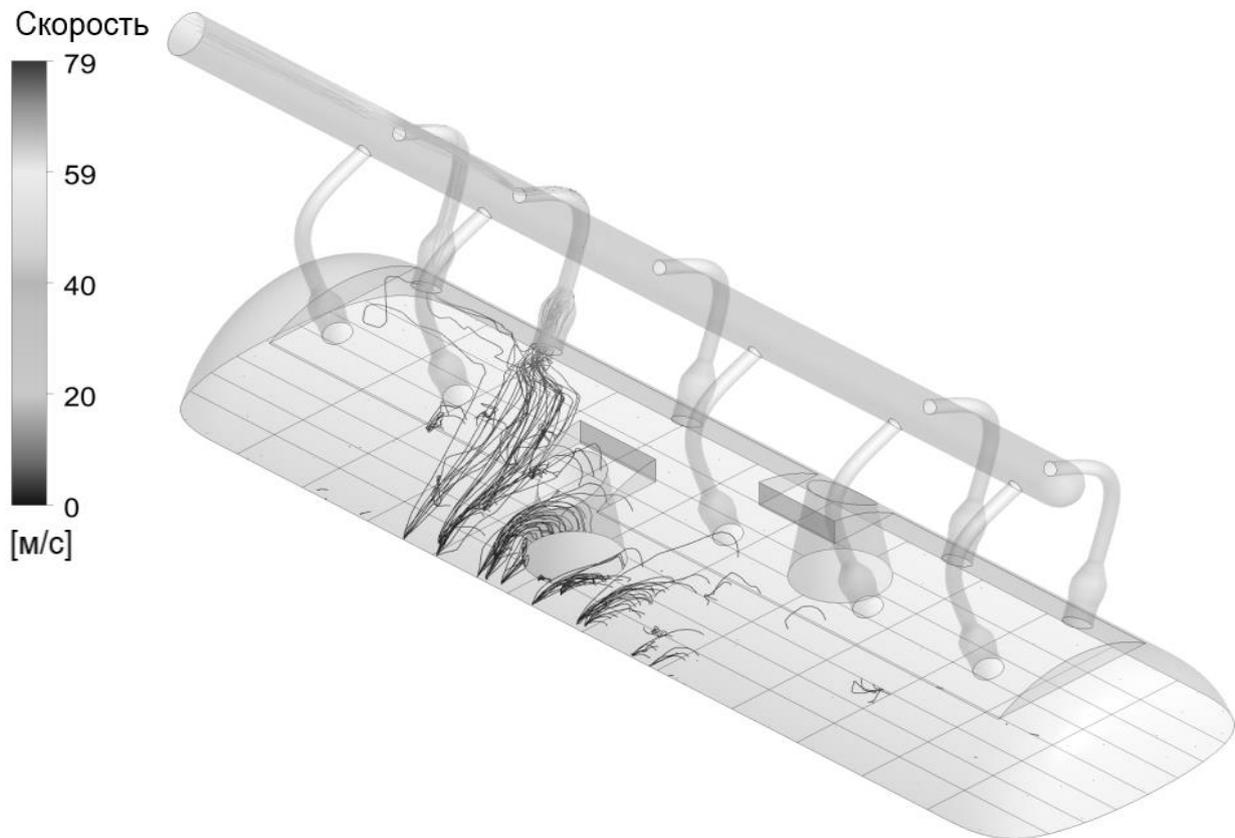


Рис. 11. Траектории частиц диаметром 400 мкм

Капли влаги диаметром 10, 50, 100, 200 мкм имеют схожие траектории движения, но отличаются количеством частиц, попавших в паропровод.

В областях, где скорость выхода пара с поверхности зеркала испарения не велика (в зонах эллиптических обечаек), капли диаметром 200 и 300 мкм оседают на поверхность зеркала испарения.

Отличительная черта каплей диаметром 400 мкм связана с их выбросом в один коллектор. Это связано с тем, что входная скорость пара в области горячего коллектора высокая (выше скорости витания), ка-

пельная влага подхватывается установившимся потоком пара и вылетает в коллектор. В областях с относительно низкой скоростью пара скорость витания капель больше, поэтому они оседают обратно на поверхность зеркала испарения.

Капли диаметром 500 мкм выносятся паром с поверхности зеркала испарения лишь в зонах с высокой скоростью пара и практически сразу возвращаются обратно.

Результаты проведенного расчета распределения концентрации влаги в паре со стороны холодного и горячего коллекторов представлены на рис. 12.

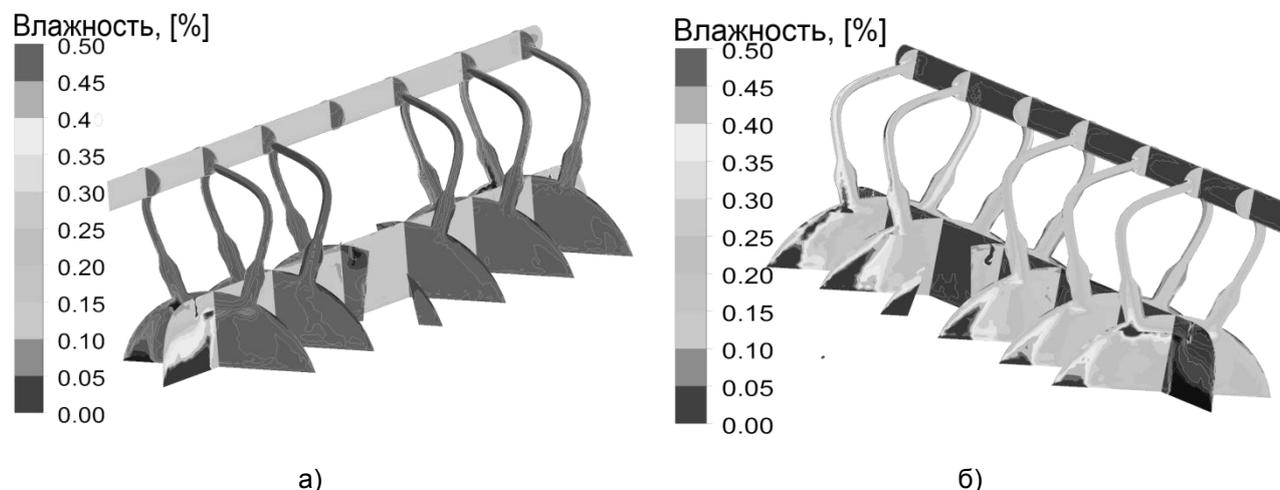


Рис. 12. Концентрация влаги в паровом объеме парогенератора: а – со стороны холодного коллектора; б – со стороны горячего коллектора

Выводы. Разработанная в ходе проведения предварительного исследования полноценная численная модель позволяет рассматривать процессы сепарации влажного пара, происходящие в паровом объеме парогенератора ПГВ-1000М. Анализ результатов проведенного исследования показывает, что характер процессов, которые протекают в модели парового объема парогенератора, соответствует теоретическим выкладкам [7] и эксплуатационным данным. Созданная математическая модель верифицирована и может быть внедрена в производство на этапе проектирования парогенераторов АЭС.

На основании экспериментальных данных и предварительных результатов моделирования процесса сепарации пара через отверстия пароприемного дырчатого листа можно сделать вывод, что конструктивные параметры дырчатого листа не оптимизированы в должной степени. Поэтому необходимо разработать модель работы пароприемного дырчатого листа с заданными

режимными параметрами и оптимизировать его конструкцию (степень перфорации, применение переменной перфорации вдоль пара, форма и угол расположения отверстий) [15]⁵. Численные исследования помогут определить наиболее оптимальную конструкцию пароприемного дырчатого листа, которая обеспечит наивысшую эффективность сепарации пара.

Кроме того, возможно и перспективно изучение влияния поверхности зеркала испарения на влажность пара в паровом объеме парогенератора [12]. В предварительном исследовании зеркало испарения рассматривалось как гладкая поверхность. Для того чтобы модель была еще более близкой к действительности, необходимо это допущение убрать, так как из-за разницы в тепловых нагрузках с «горячей» и

⁵ Емельянов Д.А. Определение выравнивающей способности погруженного дырчатого листа переменной перфорации для повышения мощности АЭС с ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2015. – 214 с.

«холодной» стороны в ПГ возникают перекосы уровня паросодержания и скорости движения пара [7], что отражено на рис. 16 на примере паросодержания.

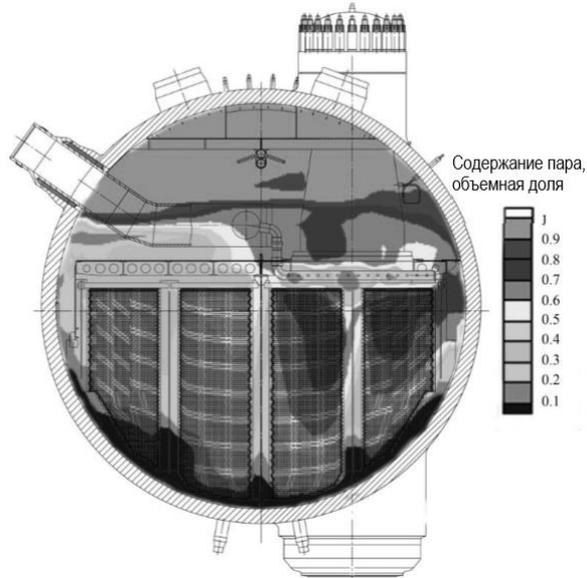


Рис. 13. Паросодержание в поперечном сечении парогенератора

Повышение эффективности сепарации пара в парогенераторах существующих и проектируемых атомных электростанций обеспечит значительную экономию средств, затраченных на ремонт лопаточного аппарата паровой турбины, и приведет к повышению тепловой эффективности станции.

Список литературы

1. Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г. Совершенствование конструкции ПГ АЭС с ВВЭР // The International Nuclear Forum «Nuclear Energy – Challenges and Prospects». – Warna, Bulgaria, June 2003.
2. Федоров Л.Ф., Рассохин Н.Г. Процессы генерации пара на атомных электростанциях. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.
3. Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л. Процессы генерации пара на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 312 с.
4. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. – М.: Высш. шк., 1974. – 360 с.
5. Стырикович М.А., Полонский В.С., Циклаури Г.В. Тепломассообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. – М.: Наука, 1982. – 368 с.
6. Сепарационные устройства АЭС / А.Г. Агеев, В.Б. Карасев, И.Т. Седов, В.Ф. Титов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 170 с.

7. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и технологические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.

8. Маргулова Т.Х., Мартынова О.И. Водные режимы тепловых и атомных электростанций. – М.: Высш. шк., 1981. – 320 с.

9. Татаринев Б.П. О факторах, определяющих качество пара паровых котлов // Известия РИИЖТа. – 1948. – Вып. XVI. – С. 48.

10. Циркуляция воды в парогенераторе ПГВ-1000 / В.Ф. Титов, Ю.В. Козлов, А.В. Некрасов и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 7. – С. 54–58.

11. Особенности гидродинамики водяного объема парогенератора ПГВ-1000М / В.Ф. Титов, Ю.В. Козлов, Б.М. Корольков и др. // Электрические станции. – 1993. – № 9. – С. 25–30.

12. Мечтаева М.Н., Горбунов В.А. К вопросу о моделировании работы парогенератора // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 31 мая – 2 июня 2017. Т. 2. – Иваново, 2017. – С. 87–90.

13. Кружилин Г.Н. Теория уноса и сепарации влаги в паровых котлах // Советское котлостроение. – 1945. – № 1. – С. 11–15.

14. Стырикович М.А. Внутрикотловые процессы. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 340 с.

15. Мечтаева М.Н., Горбунов В.А. К вопросу о моделировании процессов сепарации влаги в парогенераторе // Материалы XX Междунар. (Всерос.) науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (Бенардосовские чтения), 29–31 мая 2019 г. Т. 2. – Иваново, 2019. – С. 106–108.

References

1. Trunov, N.B., Dragunov, Yu.G. Sovershenstvovanie konstruktsii PG AES s VVER [Improving the design of steam generators for nuclear power plants with VVER]. *The International Nuclear Forum «Nuclear Energy – Challenges and Prospects»*. Warna, Bulgaria, June 2003.
2. Fedorov, L.F., Rassokhin, N.G. *Protsessy generatsii para na atomnykh elektrostantsiyakh* [Steam Generation Processes at Nuclear Power Plants]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 288 p.
3. Styrikovich, M.A., Martynova, O.I., Miro-pol'skiy, Z.L. *Protsessy generatsii para na elektrostantsiyakh* [Steam generation processes in power plants]. Moscow: Energiya, 1969. 312 p.
4. Margulova, T.Kh. *Atomnye elektricheskie stantsii* [Nuclear power plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974. 360 p.
5. Styrikovich, M.A., Polonskiy, V.S., Tsiklauri, G.V. *Teplomassoobmen i gidrodinamika v dvukhfaznykh potokakh atomnykh elektricheskikh stantsiy* [Heat and mass transfer and hydrodynam-

ics in two-phase flows of nuclear power plants]. Moscow: Nauka, 1982. 368 p.

6. Ageev, A.G., Karasev, V.B., Sedov, I.T., Titov, V.F. *Separatsionnye ustroystva AES* [Separation devices of nuclear power plants]. Moscow: Energoizdat, 1982. 170 p.

7. Trunov, N.B., Logvinov, S.A., Dragunov, Yu.G. *Gidrodinamicheskie i tekhnologicheskie protsessy v parogeneratorakh AES s VVER* [Hydrodynamic and technological processes in steam generators of nuclear power plants with VVER]. Moscow: Energoatomizdat, 2001. 316 p.

8. Margulova, T.Kh., Martynova, O.I. *Vodnye rezhimy teplovykh i atomnykh elektrostantsiy* [Water regimes of thermal and nuclear power plants]. Moscow: Vysshaya shkola, 1981. 320 p.

9. Tatarinov, B.P. O faktorakh, opredelyayushchikh kachestvo para parovykh kotlov [On factors determining the steam quality in steam boilers]. *Izvestiya RIIZhTa*, 1948, issue XVI, p. 48.

10. Titov, V.F., Kozlov, Yu.V., Nekrasov, A.V. Tsirkulyatsiya vody v parogeneratorе PGV-1000 [Water circulation in PGV-1000 steam generator]. *Teploenergetika*, 1990, no. 7, pp. 54–58.

11. Titov, V.F., Kozlov, Yu.V., Korol'kov, B.M. Osobennosti gidrodinamiki vodyanogo ob"ema parogeneratora PGV-1000M [Hydrodynamic features of water volume of PGV-1000M steam generator]. *Elektricheskie stantsii*, 1993, no. 9, pp. 25–30.

12. Mechtaeva, M.N., Gorbunov, V.A. K voprosu o modelirovanii raboty parogeneratora [On modeling the steam generator operation]. *Materialy XIX mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of XIX International scientific conference «The State and prospects of electric and thermal technology»]. Ivanovo, 2017, vol. 2, pp. 87–90.

13. Kruzhilin, G.N. Teoriya unosa i separatsii vlagi v parovykh kotlakh [The theory of ablation and separation of moisture in steam boilers]. *Sovetskoe kotloturbostroenie*, 1945, no. 1, pp. 11–15.

14. Styrikovich, M.A. *Vnutrikotlovye protsessy* [Boiler processes]. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1954. 340 p.

15. Mechtaeva, M.N., Gorbunov, V.A. K voprosu o modelirovanii protsessov separatsii vlagi v parogeneratorе [On modeling the moisture separation processes in the steam generator]. *Materialy XX mezhdunarodnoy (Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of XX International scientific conference «The State and prospects of electric and thermal technology»]. Ivanovo, 2019, vol. 2, pp. 106–108.

Горбунов Владимир Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой атомных электрических станций, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Gorbunov Vladimir Alexandrovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Head of Department of Nuclear Power Plants, e-mail: gorbunov.w@mail.ru

Лоншаков Никита Андреевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры атомных электрических станций, e-mail: nik-lon@mail.ru

Lonshakov Nikita Andreevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer, Department of Nuclear Power Plants, e-mail: nik-lon@mail.ru

Мечтаева Мария Николаевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, ассистент кафедры атомных электрических станций, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Mechtaeva Maria Nikolaevna,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student, assistant, Department of Nuclear Power Plants, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru