

Барочкин Юрий Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Yuri Evgenievich,

Ivanovo State Power Engineering University, PhD student of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Копсов Анатолий Яковлевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Kopsov Anatoly Yakovlevich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, зав. кафедрой тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovsky Grigory Vasilievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Head of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Шувалов Сергей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Shuvalov Sergey Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34 Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 621.311.22

РАСЧЕТ ПОЛЯ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ КАВИТАЦИОННО-СТРУЙНОГО ДЕАЭРАТОРА

Ю.Е. БАРОЧКИН, С.Д. ГОРШЕНИН, Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, С.И. ШУВАЛОВ, Е.В. ЗИНОВЬЕВА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. В кавитационно-струйных деаэраторах процесс десорбции растворенных газов протекает при вскипании перегретой воды, направляемой в виде закрученного вихревого потока в зону разрежения, с отводом выпара из образующейся вдоль оси потока кавитационной полости. Такие деаэраторы характеризуются сравнительно невысокой эффективностью. Однако малые габариты и способность работать без подачи греющего теплоносителя делают их полезными в тех случаях, когда по массогабаритным характеристикам или температурным условиям нельзя применить эффективные деаэраторы других типов. Расширение сферы практического применения кавитационно-струйных деаэраторов сдерживается отсутствием соответствующего математического описания, которое позволяло бы решать задачи их схемного и конструктивного совершенствования. Одна из основных задач при этом состоит в расчете поля статического давления жидкой фазы в активной зоне деаэратора. Готовых решений этой задачи в рамках предшествующих исследований не предложено. В связи с этим актуальной в научном и практическом отношении является задача разработки имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, позволяющей определять гидродинамические характеристики потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода выпара.

Материалы и методы. Моделирование гидродинамической обстановки в активной зоне кавитационно-струйного деаэратора основано на численном решении уравнений Навье-Стокса и неразрывности в декомпозиции Рейнольдса с использованием стандартной $k-\varepsilon$ -модели турбулентности для

получения предварительного решения с последующим его уточнением при переходе на SST-модель. Модель реализована средствами программного комплекса для расчета течений жидкости FlowVision.

Результаты. Впервые разработана имитационная модель активной зоны кавитационно-струйного деаэрата, позволившая определить гидродинамические характеристики потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода выпара. Определено поле статических давлений жидкой фазы в активной зоне кавитационно-струйного деаэрата.

Выводы. Полученные результаты не противоречат опубликованным данным, описывающим работу кавитационно-струйных деаэраторов, в частности подтверждают повышение вероятности переполнения деаэрата при включении отсоса выпара, а также наличие существенной зависимости эффективности деаэрации от гидравлического сопротивления тракта отсоса выпара. На базе полученных результатов может быть разработана математическая модель процесса деаэрации в рассматриваемых условиях.

Ключевые слова: термическая деаэрация, деаэрационное устройство, кавитационно-струйный деаэратор, поле статического давления, математическая модель, вихревые течения жидкости, закрученные потоки

CALCULATION OF STATIC PRESSURE FIELD OF LIQUID PHASE IN THE ACTIVE ZONE OF CAVITATION-JET DEAERATOR

Yu.E. BAROCHKIN, S.D. GORSHENIN, G.V. LEDUHOVSKY, S.I. SHUVALOV, E.V. ZINOVIEVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Abstract

Background. In cavitation-jet deaerators, the process of desorption of dissolved gases proceeds when boiling overheated water is directed in the form of a swirling vortex flow into the rarefaction zone. The removal of gases is carried out from the cavitation pocket formed along the flow axis. Such deaerators are characterized by relatively low efficiency. However, their small dimensions and the ability to work without supplying a heating coolant make them useful in cases where effective deaerators of other types cannot be applied by weight and size characteristics or temperature conditions. The expansion of the scope of practical application of cavitation-jet deaerators is hampered by the lack of appropriate mathematical description that would allow solving the problems of their schematic and constructive improvement. One of the main tasks in this case is to calculate the static pressure field of the liquid phase in the deaerator core. There are no ready-made solutions to this problem in the framework of previous studies. Thus, it is relevant from scientific and practical viewpoint to develop a simulation model of active zone of cavitation-jet deaerator, which allows determining the hydrodynamic characteristics of water flows and gas-vapor mixture when the elements, the mode of water supply and drainage evaporation change.

Materials and methods. Modeling the hydrodynamic situation in the active zone of cavitation-jet deaerator is based on the numerical solution for the Navier-Stokes equations and the continuity equation. These equations are written in the Reynolds decomposition. In this case, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model is used to obtain a preliminary solution, which is then refined during the transition to the SST turbulence model. The model is implemented by means of a software package for calculating fluid flows FlowVision.

Results. For the first time, a simulation model of the active zone of cavitation-jet deaerator was developed, which made it possible to determine the hydrodynamic characteristics of water flows and gas mixture when the elements design, the mode of water supply and drainage evaporation change. The field of static pressures of liquid phase in the active zone of cavitation-jet deaerator is determined.

Conclusions. The results obtained do not contradict the published data describing the operation of cavitation-jet deaerators. In particular, they confirm an increase in the probability of deaerator overflow when gas exhaust is turned on. The results also prove the presence of a significant dependence of the deaeration efficiency on the hydraulic resistance of the evaporation suction tract. Based on the results obtained, a mathematical model of the deaeration process under the considered conditions can be developed.

Key words: thermal deaeration, deaeration device, cavitation-jet deaerator, static pressure field, mathematical model, vortex fluid flows, swirling flow

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.013-021

Введение. Существуют деаэрационные устройства, работающие без подачи греющего пара, в которых деаэрация протекает при вскипании перегретой воды, попадающей в зону разрежения. Такие устройства, как правило, используют явление кавитации в вихревом потоке жидкости. К ним относятся, в частности, кавитационно-струйные деаэраторы [1]. Массообменная эффективность таких устройств в сравнении со струйно-барботажными деаэраторами не велика [2], однако малые габариты и возможность работы в беспаровом режиме позволяют решать задачи локального повышения эффективности деаэрации теплоносителя в тех технологических системах ТЭС, где установка высокоэффективных, например струйно-барботажных, деаэраторов не возможна по массогабаритным характеристикам либо температурным условиям.

Расширению практического использования кавитационно-струйных деаэраторов препятствует недостаточность сведений об эффективности деаэрации воды в них при изменении условий эксплуатации и конструктивных характеристик. Этим, в свою очередь, обусловлен ряд недостатков таких деаэраторов: сравнительно малая массообменная эффективность; нестабильность работы тракта отвода пара с периодическим захлебыванием деаэратора в некоторых режимах [3].

Одной из основных задач при моделировании процессов деаэрации перегретой воды, попадающей в зону разрежения, как показано в [1, 4], является расчет поля статического давления жидкой фазы в активной зоне деаэратора. Отклонение локального статического давления в жидкой фазе от давления, соответствующего насыщенному состоянию жидкости при заданной температуре деаэрируемой воды, определяет движущую силу деаэрации – разность текущей и равновесной концентраций газа в воде [5, 6]. В рассматриваемом случае мы имеем дело с закрученным вихревым потоком [7, 8], для решения поставленной задачи требуется обладать соответствующей моделью для расчета гидродинамических характеристик. На современном этапе такие задачи решают с применением специализированных программных средств для моделирования течений жидкости [9, 10].

Таким образом, актуальной в научном и практическом отношении является задача разработки имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, позволяющей определять гидродинамиче-

ские характеристики потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода пара.

Методы исследования. Гидродинамический расчет течений жидкости в общем случае предусматривает совместное решение уравнения Навье-Стокса и уравнения неразрывности [7, 8] (в векторном виде):

$$\frac{d\vec{u}}{d\tau} = -(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{u} + \vec{f}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0, \quad (2)$$

где \vec{u} – векторное поле скорости; τ – время; ρ – плотность; p – давление; ν – кинематическая вязкость; \vec{f} – векторное поле внешних сил; ∇ и Δ – оператор набла и векторный оператор Лапласа соответственно.

При турбулентных течениях имеют место колебания скорости [7]. Это обстоятельство существенно затрудняет прямое использование фундаментальных уравнений (1), (2). Решение их численными методами при больших числах Рейнольдса сопряжено с проблемой предельных вычислительных возможностей, поскольку размеры вихревых структур с увеличением числа Рейнольдса уменьшаются. Соответственно, для их разрешения требуется более мелкая расчетная сетка [8, 9]. В существующих в настоящее время программных пакетах вычислительной гидродинамики для преодоления этой проблемы используются различные модели турбулентности: стандартная k - ε -модель; RNG k - ε -модель; k - ω -модель; SST-модель; DES-модель; LES-модель и др. [9, 10].

Большинство указанных моделей турбулентности основаны на решении уравнений (1), (2), записанных в декомпозиции Рейнольдса, согласно которой произвольная величина, в частности скорость, может быть описана как сумма ее среднего значения \bar{u}_i и отклонения u'_i : $u_i = \bar{u}_i + u'_i$. В рамках этого подхода уравнение (1) (называемое в этом случае иногда уравнением Рейнольдса [8]) примет вид (в компонентах) [7, 8]

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \tau} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \rho \bar{f}_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\sigma}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right), \quad (3)$$

где σ_{ij} – напряжения в жидкости, которые могут быть определены следующим образом:

$$\bar{\sigma}_{ij} = -\bar{p} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right); \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j, \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (4)$$

где μ – динамическая вязкость.

Таким образом, при расчете турбулентных течений перечень неизвестных в решаемой системе уравнений (1), (2) – три компоненты скорости и давление – дополняют $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$ называемыми турбулентными напряжениями или напряжениями Рейнольдса [7, 8]; различия в методиках их определения (дополнительной информации для замыкания системы уравнений) составляют основные отличия в различных моделях турбулентности, используемых в программных пакетах вычислительной гидродинамики [9, 10]. Так, в стандартной k - ε -модели эту дополнительную информацию составляют два уравнения, отвечающих за генерацию k и диссипацию ε энергии турбулентности [8].

В настоящем исследовании для создания имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, работающего в режиме перегретой воды, использовались модели турбулентности, реализованные средствами программного пакета FlowVision, разрабатываемого российской компанией «ТЭСИС» [9]. Выбор собственно моделей турбулентности обусловлен следующим:

1) относительно большими размерами моделируемого аппарата в сравнении с масштабами вихревых образований, что соответствует условиям эффективного применения стандартной k - ε -модели турбулентности [9];

2) примерами и выявленными условиями успешного применения стандартной k - ε -модели и SST-модели при решении задач расчета закрученных вихревых потоков [10, 11].

На последней позиции остановимся подробнее. В [10] приведены результаты исследований по применению различных моделей турбулентности (стандартной k - ε -модели; k - ε -модели Чена; k - ω SST-модели) для расчета течений в условиях, практически полностью совпадающих с условиями, характерными для активной зоны кавитационно-струйного деаэратора: концентрированного вихря в трубе; закрученного течения в диффузоре; распада вихря после внезапного расширения. Выявлено, что модели турбулентности, основанные на осредненных по Рейнольдсу уравнениях Навье-Стокса (3), (4), в том числе и стандартная k - ε -модель, приемлемо воспроизводят экспериментальные данные. Относительное отклонение в значениях как тангенциальной, так и аксиальной составляющих скорости при расчете с использованием разных

моделей турбулентности составило от 5 до 15 %; отклонение результатов расчета по любой из моделей от экспериментальных данных – не более 20 %. В [10] исследовался поток с числом Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^5$ (определялся по диаметру и средней скорости) при параметре закрутки на входе $S_w = 0,18$. Параметр закрутки при этом определяет отношение вращательного количества движения к осевой проекции полного количества движения потока в масштабе R (внутренний радиус канала).

В кавитационно-струйном деаэраторе в режиме номинальной гидравлической нагрузки течение характеризуется значениями числа Рейнольдса около $Re = (1 \div 1,4) \cdot 10^6$ и параметром закрутки на входе около $S_w = 0,4 \div 0,5$. И то и другое превышает параметры, при которых проведены исследования в [10]. Поэтому, учитывая данные [9] по стандартной k - ε -модели, а также данные [10] по стандартной k - ε -модели и SST-модели, моделирование течения для рассматриваемых условий будем вести при совместном использовании этих моделей.

По результатам проведенного анализа эффективности применения различных моделей турбулентности выбрана описанная далее тактика моделирования. Поскольку разрешение расчетной сетки существенно зависит от выбранной модели турбулентности, для сокращения времени, затрачиваемого на решение задачи, моделирование осуществлялось в два этапа:

1) на первом этапе с использованием стандартной k - ε -модели, требующей более грубой расчетной сетки ($30 < y_+ < 300$), было получено предварительное распределение параметров течения воды в активной зоне деаэратора;

2) на втором этапе, используя предварительные результаты в качестве начальных условий, модель турбулентности изменяли на SST-модель с последующим увеличением разрешающей способности расчетной сетки для обеспечения в пристеночных областях значения параметра $y_+ < 3$.

В качестве объекта исследований принят кавитационно-струйный деаэратор номинальной производительностью 20 т/ч, по которому ранее нами получены экспериментальные данные [3]. Разработана упрощенная геометрическая модель рабочей зоны этого деаэратора (рис. 1), представляющая собой цилиндрический участок, ограниченный на входе обтекателем, формирующим поток воды с требуемой степенью крутки.

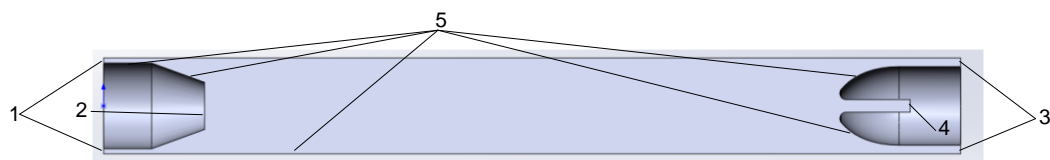


Рис. 1. Геометрическая модель активной зоны кавитационно-струйного деаэрата: 1 – входное сечение (граничное условие «Вход вода»); 2 – входное сечение (граничное условие «Вход пар»); 3 – выходное сечение (граничное условие «Выход вода»); 4 – выходное сечение (граничное условие «Выход пар»); 5 – стенка (граничное условие «Стенка»)

В выходном сечении установлен второй обтекатель, из центра которого предусмотрен отсос парогазовой смеси (выпара) эжектором. Ввиду ограничения вычислительных возможностей, задача решалась в упрощенной постановке – моделировалось двухфазное потенциальное течение двух неперемешивающихся несжимаемых жидкостей. Выбор граничных условий осуществлялся в соответствии с реальными режимными параметрами работы деаэрата, имевшими место в условиях экспериментальных исследований [3]. Принятые граничные условия отражены в таблице (см. таблицу). Расчеты на разработанной имитационной модели выполнялись для двух случаев: при отсутствии и при наличии отсоса выпара из активной зоны деаэрата при прочих равных условиях.

Расчетная сетка FlowVision – декартова, локально адаптивная. Первоначально заданная для стандартной $k-\varepsilon$ -модели сетка

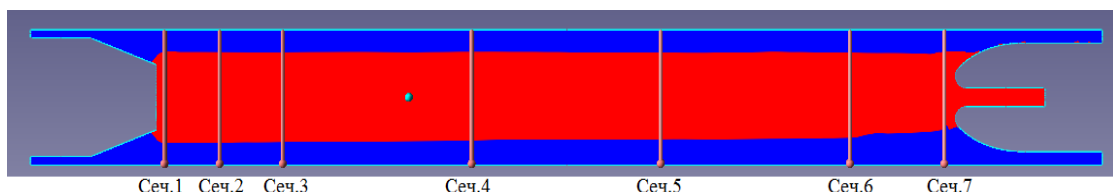
(с учетом функции подсеточного разрешения) – неравномерная, со сгущением в областях входного и выходного обтекателей, количество ячеек $\approx 7,0 \cdot 10^4$. Для перехода на SST-модель выполнялась адаптация (дополнительное разрешение) сетки с увеличением количества ячеек ($\approx 7,6 \cdot 10^5$).

Сходимость расчета оценивалась по величинам невязок скорости среды в выходном сечении и давления во входном сечении модели. Обработка результатов расчета осуществлялась с использованием стандартных средств визуализации FlowVision.

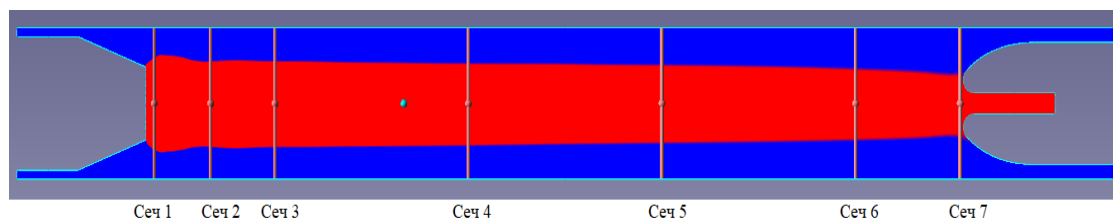
Результаты исследования. После получения решения по длине модели был выделен ряд поперечных сечений (рис. 2), для каждого из которых выполнялось построение эпюр статических и полных давлений вдоль радиуса в горизонтальном и вертикальном направлениях.

Принятые граничные условия

Граничное условие	Тип граничного условия	Параметр	Значение
1 – «Вход вода»	Вход / Выход	Закрутка скорости	В соответствии с результатами экспериментальных исследований
2 – «Вход пар»	Вход / Выход	Нормальная массовая скорость	
3 – «Выход вода»	Вход / Выход	Свободный выход	
4 – «Выход пар»	Вход / Выход	Свободный выход (задача без отсоса выпара) Разрежение (задача с отсосом выпара)	
5 – «Стенка»	Стенка	–	Прилипание



а)



б)

Рис. 2. Профили фаз и выбранные поперечные сечения (сеч.) по длине модели при отсутствии (а) и наличии (б) отсоса выпара

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты расчета для сечения № 4 (задача при наличии отсоса выпара). На рис. 4 показан пример эволюции эпюр избыточных статических давлений по ходу течения воды в активной зоне деаэратора для задачи при наличии отсоса выпара. Соответственно, таких рисунков для каждого режима работы

деаэратора (при наличии и при отсутствии выпара) получали два – для избыточного статического и для полного давления жидкой фазы. Далее по полученным эпюрам вычислялось среднее статическое и полное давление в потоке воды в данном сечении модели. Результаты такого осреднения отражены на рис. 5.

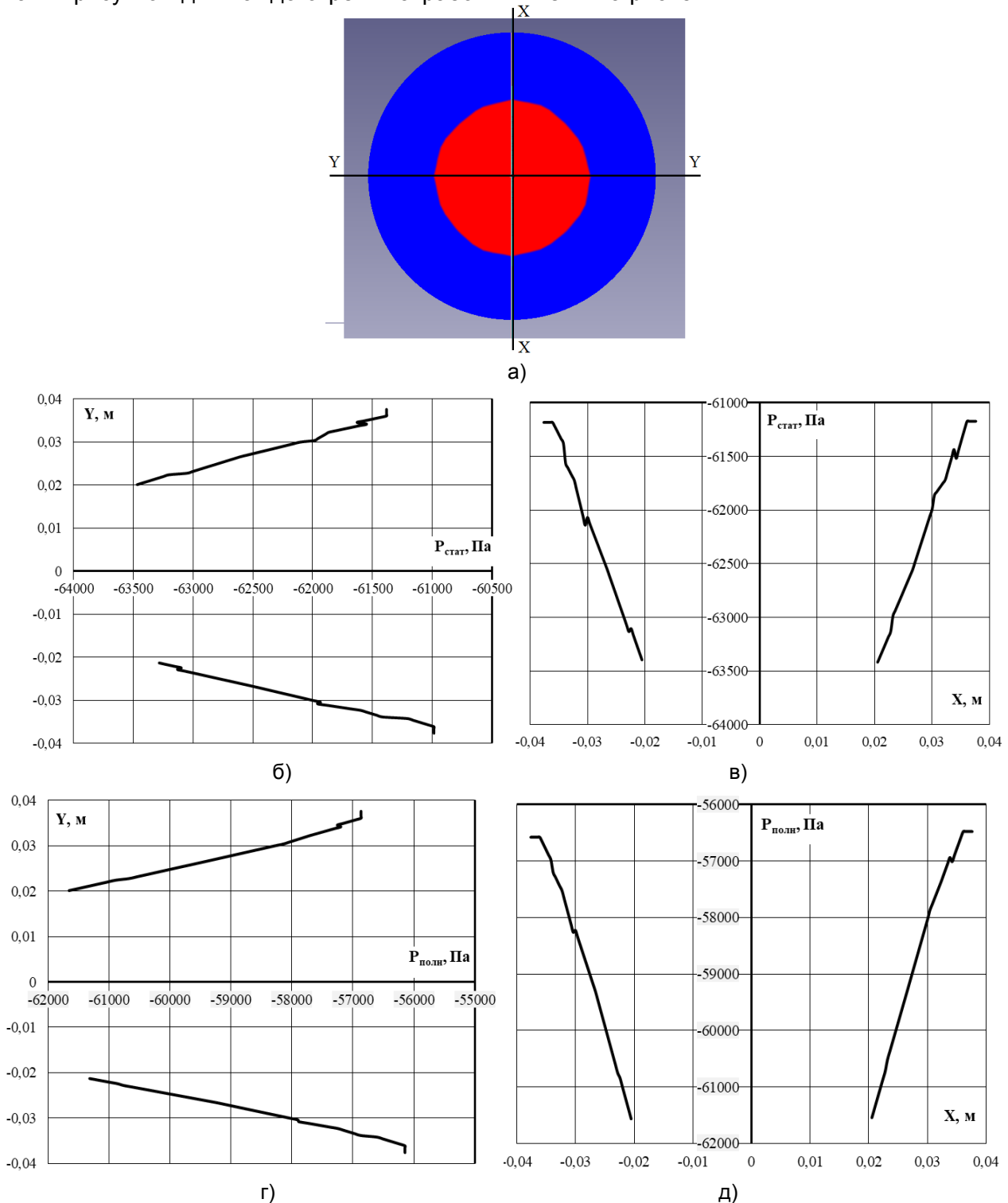


Рис. 3. Результаты расчета для поперечного сечения № 4 модели по рис. 2,б: а – распределение фаз по сечению; б, в – распределение избыточных статических давлений вдоль осей Y и X поперечного сечения соответственно; г, д – распределение избыточных полных давлений вдоль осей Y и X поперечного сечения соответственно; $P_{стат}$ и $P_{полн}$ – избыточное статическое и избыточное полное давление соответственно

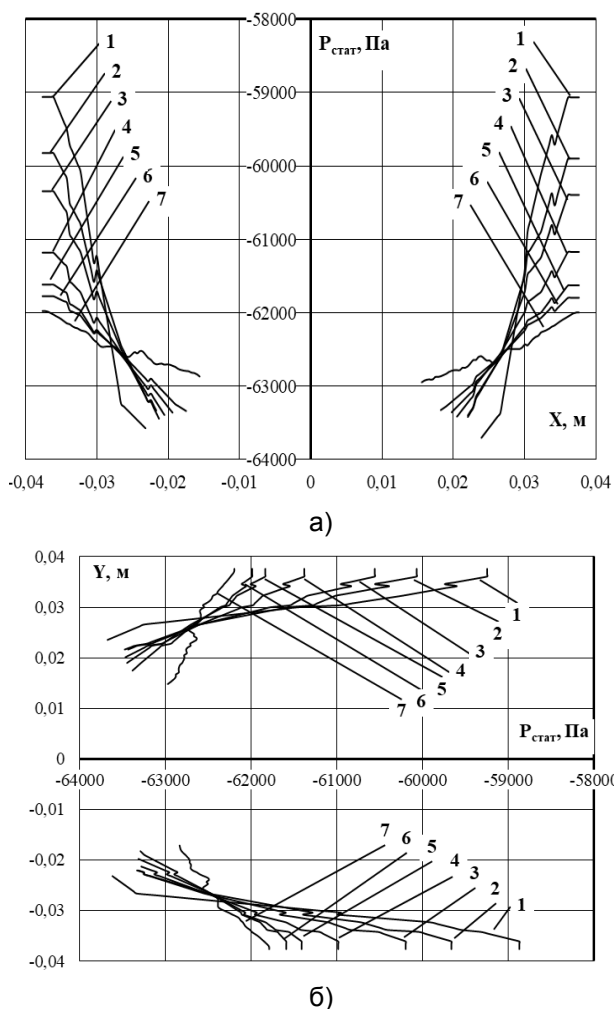


Рис. 4. Эволюция эпюр избыточных статических давлений по координатам X (а) и Y (б) от сечения к сечению модели по рис. 2,б: цифрами обозначены номера сечений модели; прочие обозначения соответствуют рис. 3

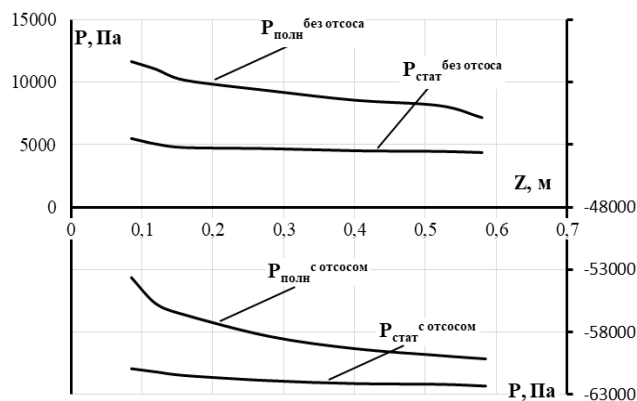


Рис. 5. Средние по сечениям модели по рис. 2,б избыточные статическое и полное давления потока в зависимости от координаты Z при отсутствии (верхнее поле) и наличии (нижнее поле) отсоса паровоздушной смеси

Выводы. Получены искомые характеристики полей избыточных статического и полного давлений фаз в активной зоне кави-

тационно-струйного деаэратора. Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы.

1. Характер течения в разных поперечных сечениях модели практически совпадает. При этом наблюдается, особенно при отсутствии отсоса выпара, некоторая деформация формы поверхности раздела фаз ближе к выходному по ходу течения обтекателю, которая обусловлена действием силы тяжести, ослабляющей действие центробежной силы. Действием силы тяжести обусловлена также разница в статических давлениях на верхней и нижней образующих модели. Эффект связан с тем, что в верхней области сечения модели сила тяжести и центробежная сила разнонаправлены, а в нижней части, наоборот, имеют одинаковое направление и складываются, увеличивая статическое давление. Статические давления на левой и правой образующих модели практически совпадают.

2. Постепенное уменьшение среднего статического давления жидкости по ходу ее движения в активной зоне деаэратора связано с уменьшением полного давления потока (рис. 5). Динамическое давление (разность между полным и статическим) также уменьшается по ходу течения из-за наличия потерь энергии.

3. Отсос выпара приводит к утолщению слоя жидкости по всей длине активной зоны деаэратора на величину от 13 до 20 % (большие значения относятся к сечениям, расположенным ближе к выходному по ходу движения воды обтекателю).

4. Важно отметить, что в задаче с отсосом выпара статическое давление на границе раздела фаз (внутренней поверхности потока воды в активной зоне) отличается от заданного граничного условия для выходного сечения 4 по рис. 1: задано избыточное давление «минус» 68 кПа; статическое давление на поверхности воды в активной зоне в среднем составляет «минус» 63,2 кПа. Разница обусловлена потерями давления парогазовой смеси в основном в области собственно отсоса паровоздушной смеси.

Учитывая, что изменение статического давления по радиусу вихревого потока воды относительно не велико (в среднем избыточное статическое давление на периферии потока «минус» 61,18 кПа, т. е. среднее изменение вдоль радиуса от внутренней до наружной границ потока составляет лишь около 2 кПа), следует заключить, что статическое давление в потоке воды в активной

зоне деаэратаora практически полностью определяется сопротивлением тракта отсоса выпара. При этом указанные потери давления увеличиваются при увеличении удельного расхода выпара, т. е. при увеличении начального перегрева воды перед деаэратором. Это обстоятельство необходимо учитывать при разработке математической модели процесса деаэрации воды в рассматриваемых условиях.

5. Ценный для последующего моделирования процесса деаэрации вывод позволяет сделать также сопоставление изменений избыточных статических и полных давлений потока по длине модели при отсутствии и наличии отсоса паровоздушной смеси (рис. 5): на характер изменения полного и статического давлений потока по длине модели отсос паровоздушной смеси влияния практически не оказывает; несколько большие потери полного давления потока от входного до выходного участка модели для режима с отсосом паровоздушной смеси, в сравнении с режимом без отсоса, объясняются появлением дополнительного сопротивления при контакте жидкой и газовой фаз.

Таким образом, разработанная имитационная модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратаora и полученные при ее использовании результаты моделирования позволили определить необходимые для расчета собственно процесса деаэрации характеристики полей статического и полного давлений в жидкой фазе вихревого потока. Исследования планируется продолжить в направлении конструктивного совершенствования выходного по ходу движения воды обтекателя и канала отвода выпара для уменьшения коэффициента местного гидравлического сопротивления этого элемента, что обеспечит повышение эффективности массообменных процессов в аппарате.

Список литературы

1. **Повышение** эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств / Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 1. – С. 5–13.
2. **Шарапов В.И., Макарова В.Е.** О прямооточных вакуумных деаэратаорах // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 3. – С. 42–44.
3. **Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В.** Выбор схемы включения прямооточных деаэрационных устройств // Материалы IV Российской науч.-практ. конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». – Иваново, 2005. – С. 63–65.

4. **Исследование** начального эффекта при десорбции растворенного кислорода в деаэратаорах перегретой воды / Ю.Е. Барочкин, В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, Е.В. Барочкин // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 5. – С. 5–10.

5. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэратаора / Ульянов. гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2003. – 560 с.

6. **Олиker И.И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.

7. **Дейч М.Е., Филиппов Г.А.** Газодинамика двухфазных сред. – 2-е изд. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 с.

8. **Physical Hydrodynamics** / Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit, Catalin D. Mitescu. – Oxford: Oxford University Press, 2015. – 544 p.

9. **Применение** пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.

10. **Сентябов А.В., Гаврилов А.А., Дектярев А.А.** Исследование моделей турбулентности для расчета закрученных потоков // Теплофизика и аэромеханика. – 2011. – Т. 18, № 1. – С. 81–93.

11. **Абиев Р.Ш., Васильев М.П., Доильницын В.А.** Исследование процесса вакуумной дегазации воды в вихревом струйном аппарате // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2015. – № 28(54). – С. 64–69.

References

1. Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, Yu.E., Vinogradov, V.N., Barochkin, A.E. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 1, pp. 5–13.
2. Sharapov, V.I., Makarova, V.E. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 3, pp. 42–44.
3. Shatova, I.A., Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V. *Vybor skhemy vklyucheniya pryamotochnykh deaeratsionnykh ustroystv* [The choice of connection circuit for direct-flow deaeration devices]. *Materialy IV Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Povyshenie effektivnosti teploenergeticheskogo oborudovaniya»* [Proceedings of IV Russian Conference on Improving Efficiency of Thermal Power Equipment]. Ivanovo, 2005, pp. 63–65.
4. Barochkin, Yu.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 5–10.
5. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deajeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk: UGTU, 2003. 560 p.
6. Oliker, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal deaeration water heating in industrial boilers and heat networks]. Leningrad: Stroyizdat, 1972. 137 p.
7. Deych, M.E., Filippov, G.A. *Gazodinamika dvukhfaznykh sred* [Gas dynamics of two-phase flows]. Moscow: Energoizdat, 1981. 432 p.

8. Etienne Guyon, Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin, Luc Petit, Catalin D. Mitescu. Physical Hydrodynamics. Oxford University Press, 2015. 544 p.

9. Kondranin, T.V., Tkachenko, B.K., Bereznikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Application packages for

fluid and gas mechanics courses]. Moscow: MFTI, 2005. 104 p.

10. Sentyabov, A.V., Gavrilov, A.A., Dektyarev, A.A. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2011, vol. 18, no. 1, pp. 81–93.

11. Abiev, R.Sh., Vasil'ev, M.P., Doil'nitsyn, V.A. *Izvestiya SPbGTI(TU)*, 2015, no. 28(54), pp. 64–69.

Барочкин Юрий Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru *Barochkin Yuri Evgenievich,* Ivanovo State Power Engineering University, PhD student of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, адрес г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Gorshenin Sergey Dmitrievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering, Associate Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, зав. кафедрой тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovsky Grigory Vasilievich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Head of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lgv83@yandex.ru

Шувалов Сергей Ильич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Shuvalov Sergey Ilyich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Зиновьева Екатерина Витальевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, адрес г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Zinovieva Ekaterina Vitalievna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants Department, address: Ivanovo, 34Rabfakovskaya st., bld. B, room 408, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 621.187.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ КОРРОЗИИ СТАЛИ ВО ВРЕМЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

А.Ю. ФЕДОРОВА, Е.Н. БУШУЕВ

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: abdvlenka@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для химических очисток внутренних поверхностей пароводяных трактов котлов используются традиционные и новые мощные кислотные реагенты. В ранее проведенных исследова-