

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КАВИТАЦИОННО-СТРУЙНОГО ДЕАЭРАТОРА В СИСТЕМАХ ВОЗВРАТА КОНДЕНСАТА ОТДАЛЕННЫХ ВНЕШНИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТЭС

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

Авторское резюме

Состояние вопроса. На ТЭС эксплуатируются технологические системы возврата конденсата пара отдаленных внешних потребителей, в которых необходимо обеспечить защиту металла от коррозии и за счет этого выполнить нормативные требования по концентрации соединений железа в поступающем на электростанцию конденсате. В таких системах отсутствует возможность применения термических деаэраторов, работающих с подачей греющего пара. Целью исследования является оценка эффективности использования в таких условиях деаэраторов перегретой воды, в частности кавитационно-струйных, то есть определение влияния работы нового элемента системы – деаэратора – на нормируемые химические показатели возвращаемого конденсата.

Материалы и методы. Использована основанная на теории подобия процессов тепломассообмена математическая модель деаэраторов перегретой воды, методика расчета скорости коррозии трубопроводов возвратного конденсата, а также экспериментальные данные по ТЭС среднего давления.

Результаты. Обоснована эффективность технического решения, предусматривающего установку кавитационно-струйных деаэраторов в системах возврата конденсата внешних потребителей. Разработано математическое описание системы, позволяющее определять требуемую производительность деаэраторов и необходимую в каждом режиме кратность рециркуляции воды через них. Применительно к фактическим условиям ТЭС разработаны рекомендации для эффективного применения предложенного технического решения на практике.

Выводы. Установка деаэратора по схеме рециркуляции через бак сбора конденсата, в сравнении с последовательной схемой, позволяет уменьшить капитальные затраты и обеспечить работу деаэратора в режиме наибольшей эффективности. Выбор номинальной производительности деаэраторов следует проводить с учетом суточных графиков изменения расхода поступающего конденсата и концентрации растворенного кислорода в нем. В большинстве режимов работы системы удастся обеспечить выполнение нормативных требований по массовой концентрации продуктов коррозии в возвращаемом на ТЭС конденсате. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и повышении эффективности существующих ТЭС, осуществляющих отпуск пара внешним потребителям.

Ключевые слова: система возврата конденсата технологического пара, продукты коррозии, термическая деаэрация, деаэрационное устройство, кавитационно-струйный деаэратор, математическая модель деаэратора

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF CAVITATION-JET DEAERATOR IN CONDENSATE RETURN SYSTEMS OF REMOTE EXTERNAL CONSUMERS OF THERMAL POWER PLANTS

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

Abstract

Background. Thermal power plants (TPPs) operate technological systems for the steam condensate return from remote external consumers. In such systems, it is necessary to protect the metal from corrosion. This will allow fulfilling the regulatory requirements for the concentration of iron compounds in the condensate entering the power plant. Such systems do not use thermal deaerators operated by using heating steam. The aim of the undertaken study is to assess the efficiency of superheated water deaerator use in such conditions, in particular cavitation-jet deaerators. It means determining the effect of a new element of the system – the deaerator – on the normalized chemical parameters of the returned condensate.

Materials and methods. A mathematical model of superheated water deaerators is used. The employed model is based on the theory of similarity of heat and mass transfer processes. The methodology for calculating the corrosion rate of return condensate pipelines was used, as well as experimental data on medium pressure TPPs.

Results. The efficiency of cavitation-jet deaerators in condensate return systems of external consumers has been estimated. A mathematical description of the system has been developed, which allows determining the required performance of deaerators and the required ratio of water recirculation through them in each mode. Recommendations for effective practical applications of the proposed technical solution have been developed considering the actual conditions at thermal power plants.

Conclusions. It is advisable to install a deaerator according to the recirculation scheme through the condensate collection tank. This scheme, compared to a sequential scheme, enables to reduce capital costs and ensure that the deaerator operates in the highest efficiency mode. The choice of the nominal capacity of deaerators should be carried out taking into account the graphs of the change in the flow rate of incoming condensate and the concentration of dissolved oxygen in it during the day. In most operating modes of the system, it is possible to ensure compliance with the regulatory requirements for the mass concentration of corrosion products in the condensate returned to the TPP. The obtained results can be used in the design of new and improving the efficiency of existing TPPs that supply steam to external consumers.

Key words: process steam condensate return system, corrosion, thermal deaeration, deaeration device, cavitation-jet deaerator, mathematical model

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.6.005-013

Введение. Наличие систем возврата конденсата пара внешних потребителей характерно для промышленных ТЭС (или теплоэлектроцентралей (ТЭЦ)), снабжающих паром какие-либо технологические установки основного производства соответствующего предприятия. Как правило, такие объекты характеризуются разветвленной и протяженной системой паропроводов, собственно технологических установок, баков сбора конденсата, насосных установок и соответствующих трубопроводов возврата конденсата. Какой-либо защиты конденсата от аэрации в баках сбора конденсата в технологических цехах основного производства обычно не предусматривается [1–3]. Насыщение конденсата растворенными газами часто имеет место еще до его попадания в

бак сбора конденсата в силу специфики парoisпользующего оборудования предприятия (например, на текстильных производствах), и тогда защита конденсата от аэрации в баках оказывается вовсе бесполезной. Перекачка конденсата, обогащенного растворенными газами, на электростанцию сопряжена с коррозионными повреждениями как соответствующих насосных групп, так и трубопроводов возврата конденсата.

Нормативных требований по содержанию в конденсате коррозионно активных газов (растворенного кислорода и диоксида углерода) к рассматриваемым технологическим системам не предъявляется, но концентрации таких газов необходимо минимизировать по условиям обеспечения нормативного химического качества теплоносителя.

ля по другим показателям, например по концентрации соединений железа в конденсате, поступающем на электростанцию. Эта проблема проявляется тем более остро, чем больше протяженность трубопроводов возврата конденсата, следовательно, является особо актуальной для отдаленных внешних потребителей пара.

Очевидным решением рассматриваемой проблемы является деаэрация конденсата перед его перекачкой на электростанцию. Однако термические деаэраторы традиционных типов (струйно-барботажные, щелевые, насадочные и т.п.) обычно не применяются, даже при наличии соответствующего места и возможности использовать греющий пар. Причина этого заключается в том, что рассредоточенность отдельных объектов рассматриваемых систем пароснабжения требует либо применения полностью автоматизированных деаэрационных установок, либо присутствия энергетического персонала – и то и другое сопряжено с дополнительными затратами. Поэтому в большинстве случаев от деаэрации конденсата отказываются, неся повышенные расходы на ремонт конденсатопроводов возвратного конденсата либо увеличенные эксплуатационные затраты на водоподготовку ТЭС (при отказе от возврата конденсата на источник тепловой энергии).

На ТЭС среднего давления отказ от приема конденсата имеет еще один неочевидный недостаток: уменьшается доля конденсата и увеличивается доля химически очищенной добавочной воды в расходе питательной воды паровых котлов. В связи с этим увеличивается щелочность питательной воды и ввиду протекания в котлах процессов термического разложения гидрокарбонатов и гидролиза карбонатов содержание в паре котлов свободного диоксида углерода [4]. В результате ухудшаются коррозионные условия работы всех прочих пароконденсатных систем внешних и внутренних потребителей пара.

Таким образом, задача деаэрации конденсата пара отдаленных внешних потребителей перед закачкой его в систему возврата конденсата на источник тепловой энергии является актуальной как по условиям обеспечения надежности собственно конденсатных систем и их оборудования, так и с точки зрения улучшения показателей водно-химического режима электростанции в целом (для электростанций среднего давления).

Актуальность рассматриваемой задачи обоснована В.К. Аваном¹, а также предшествующими исследованиями [5], однако конкретных технических решений предложено не было.

В связи с этим рассмотрим возможность и эффективность применения одного из типов деаэраторов перегретой воды – кавитационно-струйных деаэраторов (ДКС) [6–9] – в системах возврата конденсата пара внешних потребителей. Такие устройства могут работать в режиме перегретой воды, т. е. без подачи греющего пара, а их эксплуатация существенно проще в сравнении с термическими деаэраторами традиционных конструкций. Требуется решить следующие задачи:

1) обосновать выбор схемы включения ДКС в технологическую систему возврата конденсата;

2) разработать методику выбора требуемого типоразмера ДКС для конкретных условий и оценки показателей эффективности применения ДКС в рассматриваемых системах.

Методы исследования. Для решения сформулированных задач исследования требуется располагать:

– математической моделью ДКС, которая позволяла бы определять показатели эффективности деаэрации воды при изменении режимных параметров устройства;

– математической моделью коррозионных процессов в системах возвратного конденсата, связывающей теплогидравлические параметры работы конденсатопровода и концентрацию растворенного кислорода в конденсате на входе в него с нормируемым параметром – концентрацией соединений железа в конденсате на выходе из конденсатопровода.

Математическая модель ДКС разработана нами ранее [10] и представлена следующими основными соотношениями:

$$\zeta = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - \left(1 + b \frac{Ar}{Ku}\right)^{-1}; \quad (1)$$

$$Ar = \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}} - 1; \quad Ku = \frac{r}{c_p \Delta t};$$

$$b = 0,37 - 0,18g + 0,0070\Delta t_{вх};$$

$$\Delta t_{вх} = t_{вх} - t_s; \quad g = G/G_H,$$

где ζ – эффект деаэрации, ед.; C и C_0 – массовые концентрации растворенного в

¹ Аван В.К. Совершенствование водно-химического режима ТЭС среднего давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2011. – 140 с.

воде кислорода на выходе и входе ДКС соответственно, мкг/дм^3 ; b – эмпирический поправочный коэффициент; Ag и Ku – критерии Архимеда и Кутателадзе; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность воды, кг/м^3 ; $\rho_{\text{п}}$ – плотность сухого насыщенного пара, кг/м^3 , при давлении в деаэраторе $p_{\text{д}}$; r – удельная теплота парообразования, кДж/кг ; c_p – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·град.) ; Δt – изменение температуры воды в ДКС, $^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{бх}}$ – начальный перегрев воды перед деаэрационным устройством, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{вх}}$ – температура воды на входе в ДКС, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{с}}$ – температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$, при давлении $p_{\text{д}}$; g – относительная гидравлическая нагрузка ДКС, ед.; G и $G_{\text{н}}$ – текущая и номинальная гидравлическая нагрузка ДКС соответственно; значение r принимается по $p_{\text{д}}$, значения $\rho_{\text{ж}}$ и c_p – по средней температуре воды в деаэрационном элементе.

Точность модели характеризуется среднеквадратическим отклонением результатов расчета C от экспериментальных значений этой концентрации, равным 11,6 %.

Исследование коррозионных процессов в трубопроводах возврата конденсата пара внешних потребителей проведено в упомянутой ранее диссертации В.К. Авана. Автором получены экспериментальные данные по Ивановской ТЭЦ-1 (в настоящее время объект выведен из эксплуатации, но полученная информация характерна для многих ТЭС среднего давления). Испытания проведены для конденсатопровода длиной 1,3 км, диаметром 89 мм. От внешнего потребителя в конденсатопровод поступал конденсат с массовой концентрацией растворенного кислорода около $C_{\text{вх},1} = 1000 \text{ мкг/дм}^3$ (серия опытов 1) и около $C_{\text{вх},2} = 100 \text{ мкг/дм}^3$ (серия опытов 2). При различных расходах конденсата Q , $\text{м}^3/\text{ч}$, определялись: массовая концентрация растворенного кислорода на выходе из конденсатопровода (на вводе в ТЭЦ) $C_{\text{вых}}$, мкг/дм^3 ; массовая концентрация продуктов коррозии в конденсате на выходе из конденсатопровода в пересчете на Fe – $[\text{Fe}]$, мкг/дм^3 . Кроме того, вычислялся массовый поток продуктов коррозии в пересчете на Fe – G_{Fe} , г/ч. Результаты исследований, проведенных В.К. Аваном, приведены в таблице.

Анализ полученных данных (см. таблицу) показывает, что в испытаниях во всех режимах наблюдалось превышение норма-

тива $[\text{Fe}]^2$, равного 100 мкг/дм^3 , а уменьшение расхода конденсата приводило к увеличению $[\text{Fe}]$ из-за увеличения располагаемого времени коррозионного процесса и наличия диффузионного ограничения потребления кислорода в нем.

Результаты исследования процесса коррозии конденсатопровода возврата конденсата внешних потребителей Ивановской ТЭЦ-1 (В.К. Аван)

Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	$C_{\text{вых}}/C_{\text{вх}}$	$[\text{Fe}]$, мкг/дм^3		G_{Fe} , г/ч	
		при $C_{\text{вх},1}$	при $C_{\text{вх},2}$	при $C_{\text{вх},1}$	при $C_{\text{вх},2}$
10	0,305	1510	200	15,1	2,00
14	0,395	1400	175	19,6	2,45
20	0,450	1100	150	22,0	3,00
28	0,570	990	125	27,7	3,50

По результатам обобщения полученных данных разработана методика расчета скорости коррозии трубопроводов возвратного конденсата внешних потребителей, учитывающая как конструктивные характеристики трубопровода (длину, диаметр), так и режим его работы (расход конденсата, массовую концентрацию растворенного в нем кислорода и др.). Методика позволяет рассчитать при известных значениях указанных параметров концентрацию продуктов коррозии в пересчете на Fe в конденсате, выходящем из трубопровода возвратного конденсата, т.е. поступающем на ТЭЦ, и поэтому может быть использована для решения сформулированных выше задач.

При выборе схемы технического решения можно рассматривать включение ДКС в технологическую систему возврата конденсата по двум вариантам: непосредственно на потоке конденсата, направляемого потребителям, при пропуске через ДКС полного расхода этого конденсата (вариант № 1) и по схеме рециркуляции (вариант № 2).

При реализации варианта № 1 требуется установка промежуточного бака слива деаэрированного конденсата и дополнительной группы насосов, которые будут закачивать конденсат в трубопровод возврата конденсата. Такое решение нельзя признать рациональным в связи с большими затратами на реализацию. Кроме того, в

² Правила технической эксплуатации тепловых электрических станций и сетей Российской Федерации: офиц. текст: утв. Приказом Минэнерго России №229 от 19.06.03: ввод. в действие с 30.06.03 : зарег. в Минюсте России 20.06.03 №4799.

такой схеме гидравлическая нагрузка деаэратора будет определяться текущим расходом возвратного конденсата, который может оказаться неоптимальным с точки зрения эффективности деаэрации. Поэтому в качестве итогового выбран вариант № 2 (рис. 1). В этом случае все недостатки, указанные для варианта № 1, автоматически исключаются: установка промежуточного бака и дополнительных насосов не требуется, в гидравлическую нагрузку деаэратора можно устанавливать оптимальной практически независимо от текущего расхода возвратного конденсата. Недостатками же можно считать следующее:

1) увеличение затрат электроэнергии на перекачку возвратного конденсата в связи с увеличением загрузки насосов возвратного конденсата и появлением насоса рабочей воды эжектора деаэратора (в случае использования водоструйного эжектора) или механического вакуумного насоса (при его использовании в качестве воздухоудаляющего устройства деаэратора);

2) необходимость обеспечения защиты бака сбора конденсата от аэрации находящегося в нем конденсата (с применением паровой подушки – при наличии вблизи паропровода, либо герметизирующей жидкости – при отсутствии такого паропровода).

Для схемы использования ДКС с рециркуляцией справедливо выражение

$$C_{\text{ДКС}} = C_{\text{ф}} \frac{1}{1 + K_{\text{рец}} \zeta}, \quad (2)$$

где $C_{\text{ДКС}}$ и $C_{\text{ф}}$ – массовая концентрация растворенного кислорода в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата, соответственно после установки ДКС по предлагаемой схеме и без ДКС (фактическая концентрация), мг/дм³; $K_{\text{рец}}$ – кратность рециркуляции – отношение расхода конденсата $G_{\text{ДКС}}$, т/ч, на рециркуляцию через ДКС к расходу конденсата $G_{\text{к}}$, т/ч, закачиваемому в трубопровод возвратного конденсата на ТЭЦ.

Поскольку в рассматриваемой схеме расход $G_{\text{ДКС}}$ не связан напрямую с расходом $G_{\text{к}}$ (ограничение будет наступать только по производительности установленных насосов возврата конденсата), то возможно на основе (2) расчетным путем определять требуемую гидравлическую нагрузку деаэратора $G_{\text{ДКС}}$ при каждом значении расхода возвратного конденсата $G_{\text{к}}$.

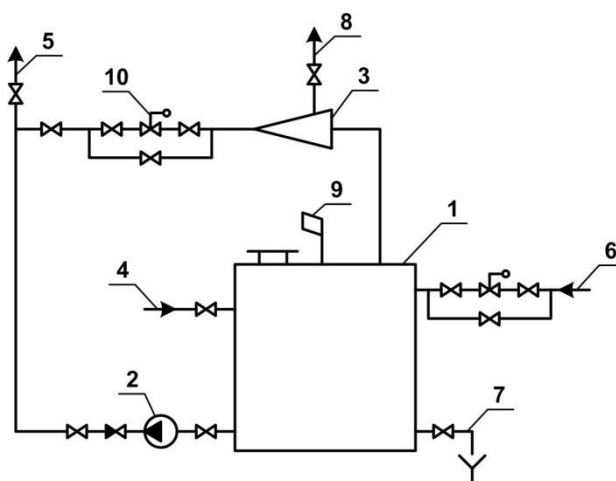


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы возврата конденсата пара системы пароснабжения внешних потребителей промышленной ТЭЦ по варианту № 2: 1 – бак сбора конденсата; 2 – насос возвратного конденсата; 3 – ДКС; 4 – ввод конденсата от паропотребляющих установок (условно показан одним штуцером); 5 – в трубопровод возврата конденсата на ТЭЦ; 6 – подвод пара на паровую подушку бака (показано целесообразное решение – с регулятором давления пара в паровой подушке); 7 – дренаж; 8 – отвод выпара (схема утилизации выпара не показана, поскольку зависит от используемого типа воздухоудаляющего устройства: эжектор водоструйный, эжектор пароструйный, механический вакуумный насос); 9 – вестовая труба бака; 10 – узел ввода воды в ДКС (показано целесообразное решение – с регулятором; возможен ввод без регулирования, что упрощает схему, но увеличивает эксплуатационные затраты ввиду невозможности поддержания расхода воды через деаэратор и, соответственно, нагрузки насоса возвратного конденсата на минимально-необходимом уровне)

В общем случае расход конденсата, поступающего в бак сбора конденсата, может не соответствовать расходу конденсата, возвращаемому на ТЭЦ (т. е. уровень конденсата в баке может увеличиваться или уменьшаться). Для таких условий расчетные выражения для определения требуемого расхода $G_{\text{ДКС, тр}}$ и требуемой кратности рециркуляции $K_{\text{рец, тр}}$ примут следующий вид:

$$G_{\text{ДКС, тр}} = \frac{1}{\zeta} \left[G_0 \frac{C_0}{C_{\text{тр}}} - G_{\text{к}} \right]; \quad (3)$$

$$K_{\text{рец, тр}} = \frac{1}{\zeta} \left[\frac{G_0}{G_{\text{к}}} \frac{C_0}{C_{\text{тр}}} - 1 \right], \quad (4)$$

где G_0 , т/ч, и C_0 , мг/дм³, – соответственно суммарный расход конденсата, поступающего от потребителей в бак сбора конденсата, и средневзвешенное значение массовой

концентрации растворенного кислорода в этом конденсате; $C_{\text{тр}}$, мкг/дм^3 , – требуемое значение массовой концентрации растворенного кислорода в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата.

В частном случае при равенстве расходов G_0 и G_k (что характерно при проведении расчетов за длительный интервал времени) полученные выражения преобразуются к виду:

$$G_{\text{ДКС, тр}} = G_k \frac{1}{\zeta} \left[\frac{C_0}{C_{\text{тр}}} - 1 \right]; \quad (5)$$

$$K_{\text{рец, тр}} = \frac{1}{\zeta} \left[\frac{C_0}{C_{\text{тр}}} - 1 \right]. \quad (6)$$

Эффект деаэрации в ДКС ζ во всех приведенных выражениях при моделировании определяется по (1) с учетом температуры конденсата t_k , равной температуре воды $t_{\text{вх}}$, поступающей в ДКС.

Результаты исследования. Рассматривается использование ДКС по схеме, представленной на рис. 1, применительно к условиям Ивановской ТЭЦ-1 (см. таблицу). Эксплуатационный диапазон температуры возвратного конденсата для рассматриваемого объекта – от 70 до 80 °С.

Первоначально проведены расчеты для варианта, не требующего замены установленных насосов возврата конденсата, имеющих номинальную производительность, равную расчетной пропускной способности трубопровода возврата конденсата (40 т/ч). Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 2. При анализе полученных данных можно заключить следующее:

1) при любых эксплуатационных значениях температуры конденсата и концентрации растворенного кислорода в конденсате, поступающем в бак сбора конденсата, использование разработанного технического решения позволяет уменьшить массовую концентрацию растворенного кислорода в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата, что обеспечивает уменьшение расчетной скорости коррозии трубопровода в среднем на 43 % (при разных режимах от 31 до 49 %);

2) установка деаэратора номинальной производительностью, равной номинальной производительности собственно схемы возврата конденсата, не обеспечивает достижения нормативных значений $[\text{Fe}]$ (100 мкг/дм^3); это означает, что выбор номинальной производительности ДКС следует проводить с учетом (3) или (5).

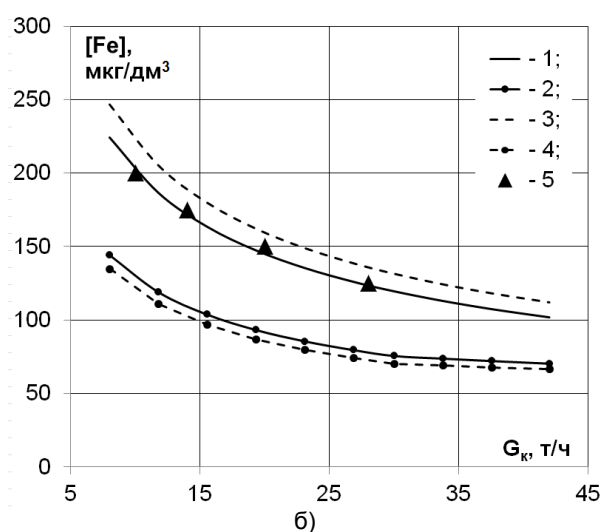
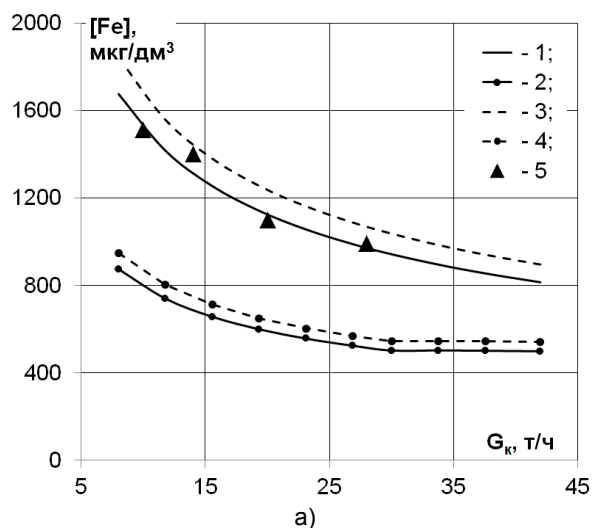


Рис. 2. Результаты исследования технического решения для условий Ивановской ТЭЦ-1 (расчет при $G_n = 40$ т/ч): а, б – при массовой концентрации растворенного кислорода в конденсате, поступающем в бак сбора конденсата от паропользующих установок, соответственно 1000 и 100 мкг/дм^3 ; $[\text{Fe}]$ – массовая концентрация продуктов коррозии в пересчете на Fe в конденсате при выходе его из трубопровода (на входе в ТЭЦ), мкг/дм^3 ; G_k – расход возвращаемого конденсата, т/ч; 1 и 3 – результаты расчета для исходной схемы (без ДКС) при температуре возвращаемого конденсата 70 и 80 °С соответственно; 2 и 4 – результаты расчета для схемы с ДКС при температуре возвращаемого конденсата 70 и 80 °С соответственно; 5 – экспериментальные данные В.К. Авана для исходной схемы (без ДКС) (см. таблицу)

При выборе типоразмера (номинальной производительности G_n) ДКС расчет для среднесуточных условий ($G_0 = 40$ т/ч, $C_0 = 230 \text{ мкг/дм}^3$) привел к значению $G_{\text{ДКС, тр}} = 27,9$ т/ч, а для средненочных условий ($G_0 = 10,5$ т/ч, $C_0 = 645 \text{ мкг/дм}^3$) – к значению

нию $G_{\text{ДКС, тр}} = 115,6$ т/ч. В результате выбран вариант с установкой одного ДКС номинальной производительностью 120 т/ч. Важно отметить, что при расчете по среднесуточным значениям G_0 и C_0 значение $G_{\text{ДКС, тр}}$ составило 160 т/ч, что существенно больше принятого значения. При таком подходе устанавливаемая мощность ДКС оказалась бы избыточной, что привело бы не только к увеличению капитальных затрат, но и к ухудшению эффективности работы установки в режимах с малой нагрузкой из-за увеличения соответствующей границы регулировочного диапазона производительности.

Выполнено расчетное исследование режимных параметров работы системы после установки ДКС выбранного типоразмера. В данном случае расход воды через ДКС в каждом режиме вычислялся минимально необходимым по условию обеспечения нормативного значения $[\text{Fe}] = 100$ мкг/дм³, но не более $G_{\text{н}}$ и не менее минимальной нагрузки регулировочного диапазона $G_{\text{мин}} = 0,2 \cdot G_{\text{н}}$. Все расчеты выполнены на среднюю температуру конденсата 75 °С. В расчетах принято $G_0 = G_{\text{к}}$. Результаты расчетов приведены на рис. 3.

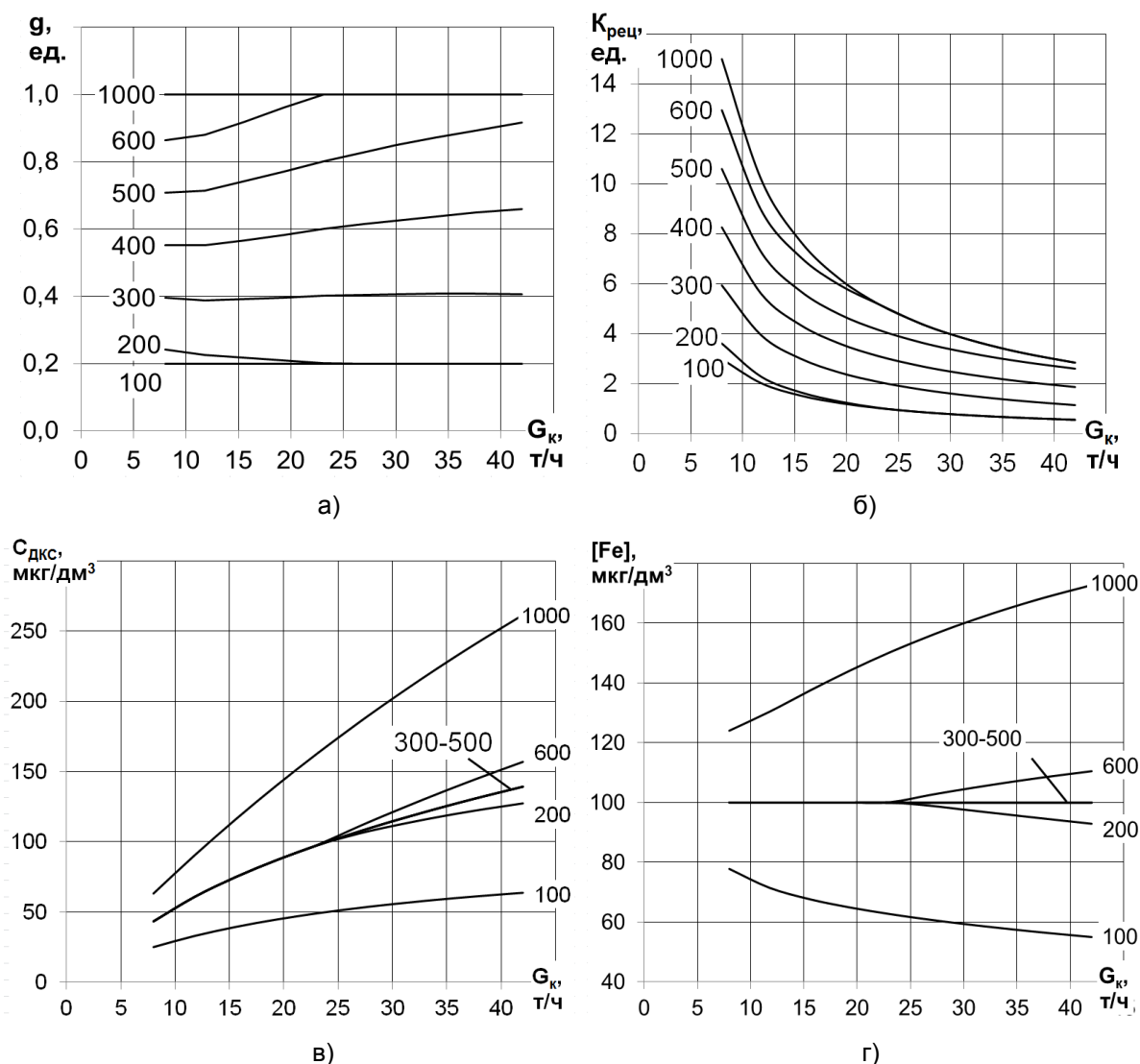


Рис. 3. Результаты исследования технического решения для условий Ивановской ТЭЦ-1 (расчет при $G_{\text{н}} = 120$ т/ч) в зависимости от расхода конденсата, возвращаемого на ТЭЦ, $G_{\text{к}}$, т/ч: а – относительная гидравлическая нагрузка ДКС g ; б – кратность рециркуляции $K_{\text{рец}}$; в – массовая концентрация растворенного кислорода $C_{\text{ДКС}}$ в конденсате, закачиваемом в трубопровод возвратного конденсата на стороне потребителя; г – расчетная массовая концентрация $[\text{Fe}]$ продуктов коррозии в пересчете на Fe в конденсате на выходе из трубопровода возвратного конденсата (на вводе в ТЭЦ); цифрами обозначены значения массовой концентрации растворенного кислорода в конденсате, поступающем в бак сбора конденсата от парoisпользующих установок, C_0 , мкг/дм³

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что в большинстве случаев возможно поддерживать такой режим работы ДКС, который будет гарантировать значения $[Fe]$ не больше нормативного (100 мкг/дм^3). Режимы с превышением этого значения соответствуют работе ДКС с номинальной нагрузкой G_n (и не наблюдались в реальных условиях для рассматриваемого объекта), а режимы при $[Fe] < 100 \text{ мкг/дм}^3$ – работе ДКС с минимально допустимой нагрузкой $G_{\text{мин}}$.

Выводы. Проведенные расчетные исследования подтверждают эффективность технического решения с установкой ДКС по схеме рециркуляции в системе возврата конденсата пара отдаленных внешних потребителей. В большинстве режимов удается обеспечить выполнение нормативных требований по массовой концентрации продуктов коррозии в пересчете на Fe в конденсате на вводе его в ТЭЦ.

Выбор номинальной производительности ДКС для предложенной схемы применения следует проводить не по среднесуточным значениям показателей работы системы в предположении равенства расходов конденсата, поступающего от парoisпользующих установок и возвращаемого на ТЭЦ, а с учетом суточных графиков изменения расхода поступающего конденсата и концентрации растворенного кислорода в нем.

Список литературы

1. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. – Л.: Изд-во «Энергия», 1971. – 185 с.
2. Шарапов В.И., Цюра Д.В. Термические деаэраторы. – Ульяновск: Ульян. гос. техн. ун-т, 2003. – 560 с.
3. Drew Grundlagen der industriellen Wasserbehandlung / Hrsg.: Drew Ameroid Deutschland GmbH. Bearb. von G. Greiner. Übers. aus dem Engl.: E. Kempel und P. Wolfram – 3., überarb. Aufl. – Essen: Vulkan-Verl., 1993.
4. Кострикин Ю.М., Мещерский Н.А., Коровина О.В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
5. Совершенствование водно-химического режима ТЭЦ среднего давления / В.Н. Виноградов, И.А. Шатова, Г.В. Ледуховский и др. // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 3. – С. 5–10.
6. Зимин Б.А. Сможет ли Россия преодолеть техническое и технологическое отставание: записки изобретателя. – М.: Новости теплоснабжения, 2011. – 225 с.

7. Зимин Б.А. Проблемы деаэрации воды в энергетике и способ их решения // Новости теплоснабжения. – 2006. – Вып. 1. – С. 40–44.

8. Шарапов В.И., Макарова В.Е. О прямых вакуумных деаэраторах // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 3. – С. 42–44.

9. Кудинов А.А., Шамшурина Г.И., Борисова Н.В. Разработка и исследование опытного вакуумно-кавитационного деаэратора // Энергетик. – 2009. – № 10. – С. 29–31.

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

References

1. Oliker, I.I., Permyakov, V.A. *Termicheskaya deaeratsiya vody na teplovykh elektrostantsiyakh* [Thermal deaeration of water at heat power stations]. Leningrad: Energiya, 1971. 185 p.
2. Sharapov, V.I., Tsyura, D.V. *Termicheskie deaeratory* [Deaerating heaters]. Ulyanovsk: UGTU, 2003. 560 p.
3. Drew Grundlagen der industriellen Wasserbehandlung. Hrsg.: Drew Ameroid Deutschland GmbH. Bearb. von G. Greiner. Übers. aus dem Engl.: E. Kempel und P. Wolfram – 3., überarb. Aufl. Essen: Vulkan-Verl., 1993.
4. Kostrikin, Yu.M., Meshcherskiy N.A., Krovina O.V. *Vodopodgotovka i vodnyy rezhim energoob"ektov nizkogo i srednego davleniya* [Water treatment and water regime of power plants of low and medium pressure]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 254 p.
5. Vinogradov, V.N., Shatova, I.A., Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, Yu.E., Doroshko, Yu.N., Zaytsev, V.N. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 3, pp. 5–10.
6. Zimin, B.A. *Smozhet li Rossiya preodolet' tekhnicheskoe i tekhnologicheskoe otstavanie: zapiski izobretatelya* [Will Russia be able to overcome the technical and technological lag: the notes of the inventor]. Moscow: *Novosti teplosnabzheniya*, 2011. 225 p.
7. Zimin, B.A. *Novosti teplosnabzheniya*, 2006, issue 1, pp. 40–44.
8. Sharapov, V.I., Makarova, V.E. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 3, pp. 42–44.
9. Kudinov, A.A., Shamshurina, G.I., Borisova, N.V. *Energetik*, 2009, no. 10, pp. 29–31.
10. Barochkin, Yu.E., Zhukov, V.P., Ledukhovskiy, G.V., Barochkin, E.V. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 5, pp. 5–10.

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