

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Повышение эффективности технологических систем ТЭС с применением кавитационных деаэрационных устройств

Г.В. Ледуховский, Ю.Е. Барочкин, В.Н. Виноградов, А.Е. Барочкин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Для технологических систем ТЭС, например конденсационных установок паровых турбин и систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением, химическое качество теплоносителя по содержанию коррозионно-активных газов является нормируемым, однако на многих ТЭС существуют проблемы с его обеспечением. Традиционное решение задачи с использованием деаэрирующей способности элементов, уже включенных в указанные системы, зачастую не позволяет получить теплоносители с требуемыми показателями качества. Возможность применения высокоэффективных струйно-барботажных деаэраторов в рассматриваемых условиях отсутствует. Существуют малогабаритные кавитационные деаэрационные устройства, которые являются перспективными для решения сформулированной задачи. Требуется проведение экспериментальных и расчетных исследований для обоснования рациональных технологических схем и оценки эффективности применения такого технического решения.

Методы и материалы: Используются методы экспериментальных исследований процессов тепломассообмена и деаэрации воды в энергетическом оборудовании, балансовых расчетов технологических систем ТЭС, а также методы регрессионного анализа данных и математической статистики.

Результаты: С использованием результатов экспериментальных исследований кавитационных деаэрационных устройств, конденсационной установки паровой турбины и систем водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов ряда энергоблоков ТЭС определены количественные характеристики влияния показателей химического качества теплоносителей на скорость коррозии конструкционных материалов в рассматриваемых системах. Разработаны новые технические решения по применению в них дополнительных деаэрационных элементов. Предложено математическое описание деаэрационных характеристик систем с учетом предложенной модернизации.

Выводы: Использование кавитационных деаэрационных устройств позволяет повысить эффективность рассматриваемых технологических систем ТЭС: массовая концентрация растворенного кислорода в турбинном конденсате уменьшается более чем в пять раз, скорость внутренней коррозии элементов системы охлаждения обмотки статора турбогенераторов уменьшается более чем вдвое, что подтверждается результатами расчетных и экспериментальных исследований. Разработанные технические решения могут применяться в энергоустановках ТЭС. Предварительно необходимо провести их проверку в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: конденсационная установка, система охлаждения, скорость коррозии, тепломассообмен, деаэрация, десорбция, кавитационный деаэратор, регрессия, математическая статистика, математическое моделирование.

Increasing the efficiency of technological systems of heat power stations by using cavitation deaerating devices

G.V. Ledukhovsky, Y.E. Barochkin, V.N. Vinogradov, A.E. Barochkin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: For technological systems of heat power plants, such as condensing units of steam turbines and water cooling systems of stator windings of hydrogen and water cooled turbogenerators, the coolant chemical quality is normalized by the content of corrosive gases. However, many heat power plants have problems maintaining it. This problem is

usually solved by employing the deaeration ability of the elements already included in these systems, which does not often allow obtaining heat carriers with the required quality indicators. And highly effective jet-type deaerators cannot be used in these conditions. However, the formulated problem can be solved by applying small-sized cavitation deaeration devices. Experimental and computational studies are needed to justify rational technological schemes and to evaluate the effectiveness of such technical solution.

Materials and methods: In this paper, we use methods of experimental studies of heat and mass exchange and water deaeration in power equipment, balance calculations of technological systems of heat power plants, and methods of regression analysis of data and mathematical statistics.

Results: By using the results of experimental studies of cavitation deaeration devices, a steam turbine condensing unit and water cooling systems of the turbogenerator stator windings of several heat power plants, we have obtained the quantitative characteristics of the influence of the coolant chemical quality on the structural materials corrosion rate in the systems. We have also developed new technical solutions for the application of additional deaerating elements in these systems and proposed a mathematical description of their deaeration characteristics after the modernization.

Conclusions: The use of cavitation deaerating devices makes it possible to increase the efficiency of the technological systems of heat power plants: the mass concentration of dissolved oxygen in the turbine condensate has decreased by more than five times, the rate of internal corrosion of the elements of the cooling system of the stator winding of turbine generators has been more than halved, which is confirmed by the computational and experimental studies. The developed technical solutions can be used at power plants of thermal power plants after conducting preliminary tests in operating conditions.

Key words: condensing unit, cooling system, corrosion rate, heat and mass exchange, deaeration, desorption, cavitation deaerator, regression, mathematical statistics, mathematical modeling.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.005-013

Введение. На ТЭС эксплуатируются технологические системы и установки, химическое качество теплоносителя в которых является нормируемым по содержанию коррозионно-активных газов. К ним относятся, например, конденсационные установки паровых турбин и системы водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением. На многих электростанциях существуют проблемы с обеспечением нормативной массовой концентрации растворенного кислорода и / или свободного диоксида углерода в таких системах.

Так, в конденсационных установках паровых турбин, особенно для теплофикационных ТЭС с прямоточными системами технического водоснабжения в зимний период (т. е. при сочетании факторов: малой паровой нагрузки конденсатора и относительно низкой температуры охлаждающей воды перед конденсатором), практически невозможно обеспечить удовлетворяющие нормативным требованиям¹ значения массовой концентрации растворенного в турбинном конденсате кислорода, причиной чего являются объективные физические ограничения при реализации в условиях конденсатора турбины процессов деаэрации [1–3].

В системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением нормируется не только массовая концентрация растворенного кислорода, но и водородный показатель рН воды, зависящий от содержания в воде диоксида углерода. Опубликованные данные [4, 5] указывают, что из-за коррозионных повреждений полых охлаждаемых медных проводников в таких системах наблюдается до 10 % от общего числа инцидентов и аварий с остановом энергоблоков по причинам, связанным с турбогенераторами. Тем не менее на многих ТЭС не уделяется должного внимания обеспечению нормативных требований² к химическому качеству дистиллята в таких системах. Основной причиной этого является отсутствие данных о зависимости скорости коррозии медных проводников от показателей химического качества циркулирующего через них дистиллята.

Очевидным решением проблемы в обоих рассматриваемых случаях является применение деаэраторов. Однако эффективные термические деаэраторы в таких системах применяться не могут, во-первых, из-за существенных ограничений по массогабаритным характеристикам, во-вторых, ввиду их потребности в греющем паре.

Существуют малогабаритные деаэрационные устройства, работающие без пода-

¹ Правила технической эксплуатации тепловых электрических станций и сетей Российской Федерации: офиц. текст: утв. Приказом Минэнерго России № 229 от 19.06.03: введ. в действие с 30.06.03: зарег. в Минюсте России 20.06.03 № 4799. – М.: Омега-Л, 2006. – 256 с.

² Об организации водно-химического режима системы охлаждения обмоток статоров турбо- и гидрогенераторов: Эксплуатационный циркуляр Ц-10-85(Э) // Сб. решений и циркуляров ГТУ Минэнерго СССР за 1985 г. (Электротехническая часть). – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986.

чи греющего пара, в которых деаэрация воды протекает за счет так называемого начального эффекта [6, 7] – при вскипании перегретой воды, попадающей в зону разрежения. Такие устройства, как правило, используют явление кавитации в вихревом потоке жидкости. Среди кавитационных деаэрационных устройств, которые могут применяться в рассматриваемых условиях, следует отметить деаэраторы «АВАКС» [8, 9] и центробежно-вихревые деаэраторы ДЦВ [10, 11]. Эффективность этих деаэраторов, по сравнению со струйно-барботажными деаэраторами, невелика, однако их малые габариты и возможность работы в беспаровом режиме составляют преимущества, делающие эти устройства потенциально полезными при повышении эффективности рассматриваемых технологических систем ТЭС.

Таким образом, целесообразно оценить возможность и эффективность использования кавитационных деаэрационных устройств в технологических системах конденсационных установок паровых турбин и водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов. Для решения этой задачи необходимо:

1) экспериментальным путем определить эффективность деаэрации воды кавитационными устройствами;

2) провести испытания конденсационной установки турбины в целях определения реальной деаэрационной характеристики конденсатора; на основе полученных данных обосновать технологическую схему включения кавитационного деаэрационного устройства в тракт конденсационной установки и

оценить эффективность такого технического решения;

3) на основе статистических данных разработать математическое описание для расчета скорости коррозии полых охлаждаемых медных проводников в системах охлаждения обмотки статора турбогенераторов в зависимости от показателей химического качества дистиллята; с использованием полученных данных разработать техническое решение по установке кавитационного деаэрационного устройства в систему.

Методы исследования. Для определения показателей эффективности кавитационного деаэрационного устройства «АВАКС» используются экспериментальные данные, полученные нами ранее [9]. Результаты проведенных испытаний деаэратора рассматриваемого типа, проведенных при его работе в режиме с рециркуляцией воды, приведены в табл. 1.

В качестве объекта экспериментальных исследований по определению деаэрационной характеристики конденсатора турбины выбран турбоагрегат Тп-115/125-130-1тп Йошкар-Олинской ТЭЦ-2. Деаэрационные испытания конденсационной установки совмещены с тепловыми испытаниями собственного турбоагрегата, что позволило получить экспериментальные данные, обладающие высокими характеристиками точности и прецизионности, поскольку основные параметры работы конденсатора определялись при сведении материальных и энергетических балансов в условиях каждого опыта. Теплотехнические характеристики турбоустановки, полученные в ходе испытаний, опубликованы нами ранее [12].

Таблица 1. Результаты испытаний деаэратора «АВАКС» в режиме рециркуляции [8]

Время от начала измерений, мин	Результаты измерений. Расход воды через деаэратор $20 \pm 1 \text{ м}^3/\text{ч}$							
	Избыточное давление, кгс/см ²		Температура воды, °С		Избыточное давление в начале линии отсоса пара, кгс/см ²	Удельный расход пара, кг/т	Содержание кислорода, мкг/дм ³	
	перед деаэратором	после деаэратора	перед деаэратором	после деаэратора			перед деаэратором	после деаэратора
0	0	0	72	72	–	0	7000	7000
5	3	0,02	72	69	–0,70	5,4	4780	750
10	3	0,02	71	68	–0,71	5,4	3230	490
15	3	0,02	71	68	–0,71	5,4	2250	320
20	3	0,02	70	66	–0,73	7,1	1550	230
25	3	0,02	70	66	–0,73	7,1	1030	160
30	3	0,02	71	67	–0,73	5,4	700	100
40	3	0,02	70	67	–0,72	5,4	330	50

Экспериментальные данные, необходимые для расчета скорости внутренней коррозии полых охлаждаемых медных проводников в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением, получены в ходе пассивных наблюдений различных энергоблоков ряда электростанций: Костромской ГРЭС (энергоблоки номинальной электрической мощностью 300 и 1200 МВт), Печорской ГРЭС (210 и 215 МВт) и Ростовской АЭС (950 и 1011 МВт). При анализе результатов использованы также данные А.Б. Ларина по Конаковской ГРЭС (300 МВт)³. Собственно разработка математического описания процессов коррозии в рассматриваемых системах выполнена методами множественной линейной регрессии [13, 14].

Уравнения для расчета массовой концентрации растворенного кислорода в рассматриваемых технологических системах после установки в них кавитационных деаэрационных устройств получены путем решения систем уравнений материального баланса по теплоносителям и растворенному в них газу.

Результаты исследования. Рассмотрим основные результаты, полученные на отдельных этапах исследования.

Эффективность кавитационных деаэрационных устройств. По данным табл. 1 выполнен расчет эффекта деаэрации воды в деаэраторе «АВАКС» по растворенному кислороду:

$$\zeta_{\text{АВАКС}} = \frac{C_0 - C}{C_0}, \quad (1)$$

где C_0 и C – массовые концентрации растворенного в воде кислорода соответственно на входе и выходе деаэратора.

На рис. 1 указанные экспериментальные данные приведены в графическом виде. Анализ результатов позволяет заключить, что эффект деаэрации воды в кавитационном деаэраторе не зависит от начальной концентрации растворенного в воде кислорода и составляет в среднем $\zeta_{\text{АВАКС}} = 0,85$ (изменяется от 0,84 до 0,85). Полученное значение существенно меньше, чем для струйно-барботажных деаэраторов (0,99 и более [6]), что подтверждает сравнительно низкую эффективность деаэрационных устройств рассматриваемого типа. Тем не менее способность работы без подачи греюще-

го пара и малые габариты позволяют рассматривать возможность применения таких устройств в случаях, когда указанные факторы являются решающими.

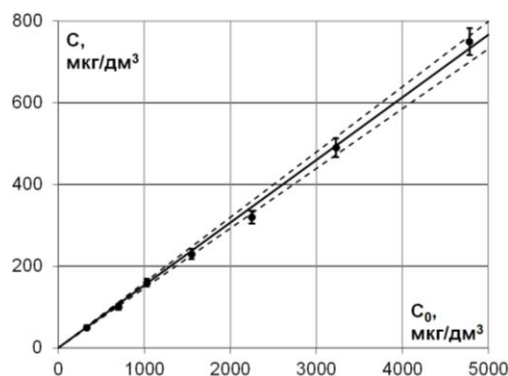


Рис. 1. Результаты экспериментальных исследований эффективности десорбции растворенного кислорода в деаэраторе «АВАКС»: C и C_0 , мкг/дм³, – массовая концентрация растворенного кислорода в воде за деаэратором и на входе в него; сплошная линия – аппроксимация экспериментальных данных

Применение кавитационных деаэрационных устройств в конденсационных установках паровых турбин. На рис. 2 приведены результаты деаэрационных испытаний конденсатора КГ1-3100 турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп. При этом в качестве определяющего параметра, в соответствии с опубликованными результатами аналогичных исследований [1], принята удельная тепловая нагрузка конденсатора. Полученный характер зависимости соответствует данным [1–3] и в целом показателям работы теплофикационных паровых турбин: нормативное значение массовой концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате (20 мкг/дм³) не обеспечивается в широком диапазоне нагрузок конденсационной установки.

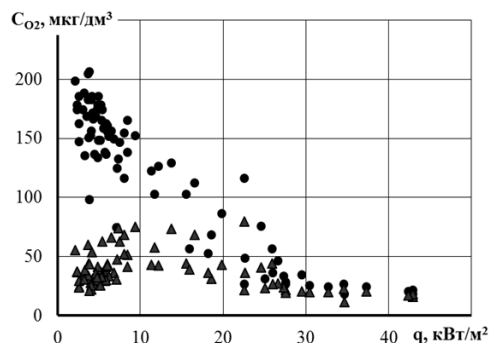


Рис. 2. Экспериментальная зависимость массовой концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате на напоре конденсатных насосов от удельной тепловой нагрузки конденсатора: C_{O_2} , мкг/дм³, – массовая концентрация растворенного кислорода; q , кВт/м², – удельная тепловая нагрузка конденсатора; ● – экспериментальные данные в разных опытах; ▲ – результаты расчета по (2) в условиях опытов

³ Ларин А.Б. Разработка метода химического контроля на основе измерений электропроводности и pH и совершенствование систем обеспечения водно-химического режима на ТЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14. – Иваново, 2017. – 471 с.

При анализе полученных данных необходимо учитывать, что в период испытаний герметичность вакуумной системы турбоагрегата соответствовала установленным нормам⁴, что подтверждено в ходе специально организованных испытаний путем отключения основного эжектора конденсационной установки на работающей турбине с определением скорости падения вакуума.

С учетом сложности встраивания деаэрационных элементов в конденсаторосборник конденсатора турбины, а также ограниченных возможностей по размещению крупногабаритных дополнительных деаэрационных устройств в технологической схеме конденсационной установки предложен вариант использования малогабаритного кавитационного деаэрационного устройства «АВАКС» (рис. 3).

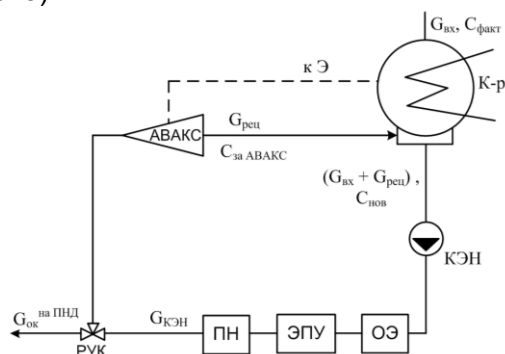


Рис. 3. Принципиальная схема технического решения с установкой деаэрационного устройства «АВАКС» в конденсационной установке турбины Тп-115/125-130-1тп Йошкар-Олинской ТЭЦ-2: К-р – конденсатор; КЭН – конденсатные насосы; ОЭ и ЭПУ – охладители основного эжектора и эжектора уплотнений соответственно; ПН – охладитель пара промежуточных камер концевых уплотнений турбины; РУК – регулятор уровня в конденсаторосборнике конденсатора; АВАКС – деаэрационное устройство «АВАКС»; к Э – к основному эжектору конденсационной установки; G – расход; C – массовая концентрация растворенного кислорода

Поскольку для нормальной работы деаэрационного устройства, работающего за счет начального эффекта деаэрации, необходимо обеспечить подачу в него воды, перегретой относительно температуры насыщения при рабочем давлении в зоне отсоса выпара, рекомендована установка «АВАКС» на трубопровод рециркуляции основного конденсата после регулятора уровня в конденсатор. В этом случае необходимый перегрев турбинного конденсата обеспечивается в теплообменниках, включенных в контур циркуляции основного конденсата (ОЭ, ЭПУ,

ПН). При этом данные [12] показывают, что температура основного конденсата за РУК оказывается тем больше, чем меньше расход пара в конденсатор. Это обстоятельство составляет важное преимущество предложенной схемы: в режимах с малой тепловой нагрузкой конденсатора, при которой, согласно данным [1–3], наблюдаются наилучшие условия для термической деаэрации турбинного конденсата, будет обеспечиваться максимальный перегрев конденсата относительно температуры насыщения перед деаэратором «АВАКС», т. е. максимальная эффективность работы этого устройства.

Для рассматриваемой схемы получено выражение для расчета массовой концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате за конденсатором $C_{нов}$, мкг/дм³:

$$C_{нов} = C_{факт} \frac{1}{1 + K_{рец} \zeta_{АВАКС}}, \quad (2)$$

где $C_{факт}$, мкг/дм³ – массовая концентрация растворенного кислорода в турбинном конденсате до установки «АВАКС» (при моделировании условно принято, что поток с этой же концентрацией газа поступает в конденсатор); $K_{рец}$ – кратность рециркуляции, представляющая собой отношение расхода конденсата на рециркуляцию $G_{рец}$ (т. е. через «АВАКС») к расходу конденсата, перекачиваемому конденсатными насосами $G_{КЭН}$; $\zeta_{АВАКС}$, ед. – эффект деаэрации в деаэраторе «АВАКС».

На рис. 2 приведены результаты расчета по (2) в сопоставлении с экспериментальными данными. Анализ результатов экспериментальных исследований, описанных в [12], показал, что во всех режимах температура за ПН превышала температуру насыщения при давлении в трубопроводе отсоса неконденсируемых газов из конденсатора на величину, существенно превышающую 2,7 °С. Поэтому, в соответствии с результатами проведенных нами ранее экспериментальных исследований (табл. 1), эффект деаэрации в деаэраторе «АВАКС» принят равным 0,85.

Применение кавитационных деаэрационных устройств в системах охлаждения обмотки статора турбогенераторов. Выполнен анализ экспериментальных данных, собранных в ходе наблюдений на энергоблоках Костромской ГРЭС, Печорской ГРЭС и Ростовской АЭС, а также принятых по результатам проведенных А.Б. Лариным на Конаковской ГРЭС исследований⁵. В табл. 2 приведены норма-

⁴ 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.

⁵ Ларин А.Б. Разработка метода химического контроля на основе измерений электропроводности и pH и совершенствование систем обеспечения водно-химического режима на ТЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.14.

тивные значения показателей химического качества дистиллята в рассматриваемой системе в сравнении с диапазонами изменения и средними значениями этих показателей в условиях эксплуатации на рассматриваемых объектах.

Отличия исполнения рассматриваемой системы на разных энергоблоках состоит в схеме отсоса паровоздушной смеси из вакуумного бака (рис. 4, поз. 5). В ряде случаев этот трубопровод заведен в тракт отсоса паровоздушной смеси из конденсатора турбины основным эжектором, в некоторых случаях установлен отдельный эжектор. Соответственно, на разных энергоблоках в вакуумном баке поддерживается различное разрежение. Это обуславливает существенно различающиеся условия деаэрации охлаждающей воды в вакуумном баке и, соответственно, показатели химического качества дистиллята.

Результаты исследований позволили разработать регрессионное уравнение для расчета скорости внутренней коррозии $K_{кор}$, мг/(м²·сутки), полых охлаждаемых медных проводников в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением в зависимости от показателей химического качества циркулирующего дистиллята:

$$K_{кор} = 3,98M_{O_2}^{0,38} \left(10^{9-pH_{25}}\right)^{0,33} \chi_{25}^{0,80}, \quad (3)$$

где M_{O_2} , pH_{25} и χ_{25} – концентрация растворенного кислорода в дистилляте, мкмоль/дм³, водородный показатель и удельная электрическая проводимость дистиллята, мкСм/см, соответственно (при температуре пробы 25 °С).

На рис. 5 приведена корреляционная диаграмма, отражающая соотношение меж-

ду значениями $K_{кор}$, рассчитанными по (3), и $K_{кор}$, определенными по экспериментальным данным. Среднеквадратическое отклонение между этими значениями составило 16,1 %.

Выражение (3) справедливо при изменении факторов в следующих диапазонах: M_{O_2} – от 0,665 до 196,250 мкмоль/дм³ (что соответствует изменению массовой концентрации растворенного кислорода от 21 до 6280 мкг/дм³); pH_{25} – от 6,18 до 8,36; χ_{25} – от 0,5 до 2,5 мкСм/см.

Для повышения эффективности защиты полных охлаждаемых медных проводников обмотки статора от коррозии со стороны дистиллята предложено техническое решение, при разработке которого учтено следующее. Увеличение разрежения в вакуумном баке для повышения эффективности деаэрации воды за счет начального эффекта в большинстве случаев невозможно, поскольку это приводит, с одной стороны, к уменьшению давления на всасе НОС с соответствующим ухудшением условий для их безкавитационной работы, с другой стороны, в таком случае увеличиваются присосы воздуха собственно в вакуумном баке и в элементах его обвязки, а также на всасывающем тракте НОС, что приводит к обратному эффекту – ухудшению деаэрационных характеристик системы. Поэтому предложено использование малогабаритных кавитационных деаэрационных устройств «АВАКС», устанавливаемых в тракт циркуляции дистиллята перед сливом его в вакуумный бак с отводом выпара в трубопровод отсоса паровоздушной смеси из конденсатора основным эжектором либо собственным (дополнительным) эжектором (рис. 4).

Таблица 2. Сопоставление фактических данных с нормативными требованиями к химическому качеству дистиллята в системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов

Показатель, единица измерения	Нормативные значения ¹	Фактические данные: минимум-максимум (среднее)			
		Конаковская ГРЭС*	Ростовская АЭС	Костромская ГРЭС	Печорская ГРЭС
Водородный показатель pH_{25}	8,5±0,5	7,80–8,35 (8,08)	7,88–8,36 (8,11)	6,65–7,40 (7,00)	6,18–6,68 (6,37)
Удельная электрическая проводимость χ_{25} , мкСм/см	≤5	0,55–1,42 (0,90)	0,82–1,82 (1,13)	1,05–2,50 (2,20)	0,50–1,10 (0,73)
Массовая концентрация растворенного кислорода S_{O_2} , мкг/дм ³	≤400	40–80 (50)	21–62 (49)	752–3488 (2852)	3050–6280 (4741)
Массовая концентрация соединений меди S_{Cu} , мкг/дм ³	≤100	1,0–5,0 (2,3)	1,2–6,9 (4,9)	30,0–130,0 (92,7)	26,4–118,8 (61,3)

Примечания: ¹ – по данным: Об организации водно-химического режима системы охлаждения обмоток статоров турбо- и гидрогенераторов: Эксплуатационный циркуляр Ц-10-85(Э) // Сб. решений и циркуляров ГТУ Минэнерго СССР за 1985 г. (Электротехническая часть). – М.: СПО Союзтехэнерго, 1986.

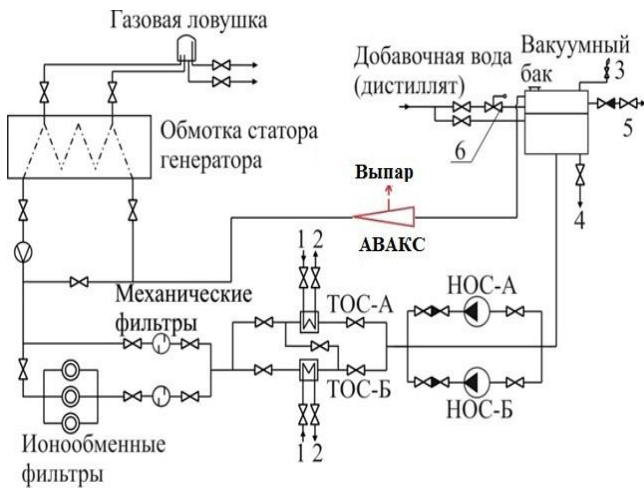


Рис. 4. Схема установки дополнительного деаэриционного устройства «АВАКС» в тракт охлаждающей воды в схеме водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением: НООС – насосы охлаждения статора; ТООС – теплообменники охлаждения статора; 1, 2 – подвод и отвод охлаждающей воды из системы газоохлаждения турбогенератора; 3 и 4 – воздушник и дренаж вакуумного бака соответственно; 5 – отсос паровоздушной смеси из вакуумного бака; 6 – регулятор добавочной воды в контур охлаждения обмотки статора; АВАКС – деаэриционное устройство «АВАКС»

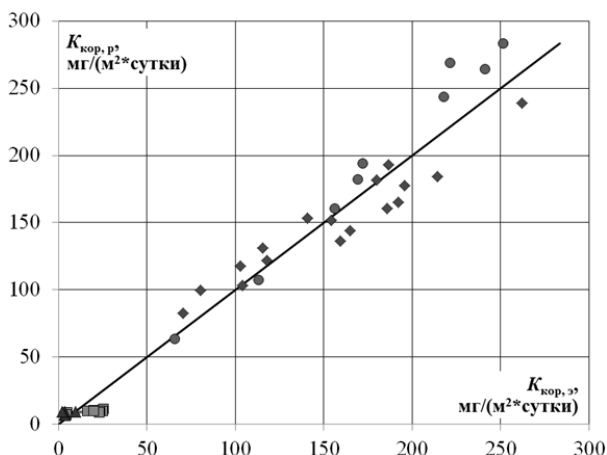


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных ($K_{кор,э}$) и расчетных ($K_{кор,р}$) значений скорости коррозии охлаждаемых обмоток статора турбогенераторов: точки – результаты расчетов для условий опытов (▲ – Конаковская ГРЭС; ● – Костромская ГРЭС; ■ – Ростовская АЭС; ◆ – Печорская ГРЭС); линия – совпадение расчетных и экспериментальных значений

Выражение для расчета массовой концентрации растворенного в дистилляте кислорода $C_{нов}$, $мг/дм^3$, после реализации предложенного технического решения имеет вид

$$C_{нов} = C_{факт} (1 - \zeta_{АВАКС}), \quad (4)$$

где $C_{факт}$ – массовая концентрация растворенного кислорода в дистилляте до установки «АВАКС», $мг/дм^3$.

На рис. 6 приведены результаты расчета по (3) скорости коррозии $K_{кор}$ для предложенной технологической схемы в условиях каждого опыта проведенных ранее экспериментальных исследований.

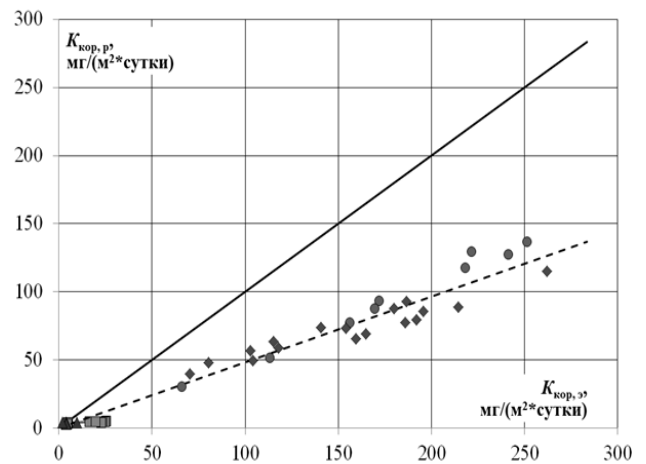


Рис. 6. Результаты расчетной оценки уменьшения скорости коррозии при реализации технического решения при условиях опытов: $K_{кор,э}$ и $K_{кор,р}$ – соответственно, экспериментальные и расчетные значения скорости коррозии охлаждаемых обмоток статора турбогенераторов: точки – результаты расчетов для условий опытов после реализации мероприятия (обозначения точек соответствуют рис. 5); пунктирная линия – аппроксимация результатов расчета при условиях опытов; сплошная линия – до реализации мероприятия

Выводы. В ходе экспериментальных исследований выявлена относительно низкая эффективность малогабаритных кавитационных деаэриционных устройств. При полученном эффекте деаэрации (0,85) такие устройства не могут применяться в качестве самостоятельных деаэраторов в соответствующих установках ТЭС. Однако преимущества этих устройств (малые габариты, возможность работы без подачи греющего пара) позволяют рекомендовать их для использования в качестве дополнительных деаэриционных элементов в технологических системах ТЭС, для которых использование эффективных струйно-барботажных деаэраторов невозможно.

Предложенные технические решения по установке кавитационных деаэриционных устройств в технологические схемы конденсационной установки теплофикационной паровой турбины и охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением эффективны. В первом случае при использовании разработанного технического решения наблюдается уменьшение массовой концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате более чем в 5 раз, особенно в наиболее критичных с точки зрения деаэрации теплоносителя режимах работы турбин по тепловому графику нагрузок. Во втором случае при реализации технического решения можно ожидать

уменьшения скорости коррозии медных проводников охлаждаемой обмотки статора в среднем в 2,1 раза.

Список литературы

1. Шемпелев А.Г., Суших В.М., Иглин П.В. О результатах сопоставления расчетных и нормативных характеристик конденсаторов паротурбинных установок в широком диапазоне их паровых нагрузок // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 60–64.
2. Bergmann D., Luft H., Ulm W. Dampfturbinen // BWK: Brenst Warme Kraft, 1996. – № 4. – P. 111–115.
3. Меркулов В.А. Удаление неконденсирующихся газов из конденсаторов турбин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – № 1. – С. 54–57.
4. Федоренко Г.М., Выговский А.В. Эффективность водоподготовки в системах непосредственного охлаждения обмоток статоров мощных турбогенераторов и ее влияние на безопасность, надежность и эффективность блоков АЭС // Труды института электродинамики Национальной академии наук Украины. – 2011. – № 30. – С. 62–68.
5. Иванов А.С., Шитов Е.М., Богачев А.В. Коррозия полых медных проводников в системах непосредственного водяного охлаждения обмоток турбогенераторов // Universum: технические науки. – 2016. – № 11(32). – С. 20–24.
6. Олиker И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
7. Орлов М.Е., Ротов П.В., Шарапов В.И. Повышение надежности и энергетической эффективности теплофикационных систем // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. – № 16. – С. 22–26.
8. Шарапов В.И., Макарова В.Е. О прямооточных вакуумных деаэраторах // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 3. – С. 42–44.
9. Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В. Выбор схемы включения прямооточных деаэрационных устройств // Материалы IV Рос. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования». – Иваново, 2005. – С. 63–65.
10. Зимин Б.А. Проблемы деаэрации воды в энергетике и способ их решения // Новости теплоснабжения. – 2006. – Вып. 1. – С. 40–44.
11. Зимин Б.А. Сможет ли Россия преодолеть техническое и технологическое отставание: записки изобретателя. – М.: Новости теплоснабжения, 2011. – 225 с.
12. Испытания турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды / Г.В. Ледуховский, А.А. Пospelov, Н.С. Асташов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 2. – С. 3–10.

Ледуховский Григорий Васильевич,
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,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

13. Heinhold I. Ingenieur Statistik. – München; Wien: Springer Verlag, 1964. – 352 p.

14. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

References

1. Shempelev, A.G., Sushchikh, V.M., Iglin, P.V. *Energetik*, 2015, no. 10, pp. 60–64.
2. Bergmann, D., Luft, H., Ulm, W. *Dampfturbinen* // *BWK: Brenst Warme Kraft*, 1996, no. 4, pp. 111–115.
3. Merkulov, V.A. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2001, no. 1, pp. 54–57.
4. Fedorenko, G.M., Vygovsky, A.V. *Trudy instituta elektrodinamiki Natsional'noy akademii nauk Ukrainy*, 2011, no. 30, pp. 62–68.
5. Ivanov, A.S., Shitov, E.M., Bogachev, A.V. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 11(32), pp. 20–24.
6. Olikier, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal deaeration of water in heating and industrial boilers and heat networks]. Leningrad, Stroyizdat, 1972. 137 p.
7. Orlov, M.E., Rotov, P.V., Sharapov, V.I. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetyki*, 2012, no. 16, pp. 22–26.
8. Sharapov, V.I., Makarova, V.E. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*, 2006, no. 3, pp. 42–44.
9. Shatova, I.A., Barochkin, E.V., Ledukhovskiy, G.V. *Vybor skhemy vklyucheniya pryamotochnykh deaeratsionnykh ustroystv* [Selecting the connection scheme of the direct-flow deaerators]. *Materialy IV Rossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Povyshenie effektivnosti teploenergeticheskogo oborudovaniya»* [Proceedings of the IVth Russian scientific and practical conference «Increasing the efficiency of heat power equipment»]. Ivanovo, 2005, pp. 63–65.
10. Zimin, B.A. *Novosti teplosnabzheniya*, 2006, issue 1, pp. 40–44.
11. Zimin, B.A. *Smozhet li Rossiya preodolet' tekhnicheskoe i tekhnologicheskoe otstavanie: zapiski izobretatelya* [Will Russia be able to overcome the technical and technological backwardness: an inventor's notes]. Moscow, *Novosti teplosnabzheniya*, 2011. 225 p.
12. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A., Astashov, N.S., Dobrov, S.V., Volkov, I.B., Komissar, G.B. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 2, pp. 3–10.
13. Heinhold, I. *Ingenieur Statistik*. München; Wien: Springer Verlag, 1964. 352 p.
14. Gmurman, V.E. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Theory of Probability and Mathematical Statistics]. Moscow, Vysshaya shkola, 2003. 479 p.

Ledukhovsky Grigory Vasilyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, No. 34 Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,
telephone: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

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,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Yuri Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Post-Graduate Student of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, No. 34 Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,
telephone: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Виноградов Владимир Николаевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры химии и химических технологий в энергетике,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 432,
телефон (4932) 38-57-83,
e-mail: V.N.Vinogradov@mail.ru

Vinogradov Vladimir Nikolayevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Technologies in Power Engineering,
address: Ivanovo, No. 34 Rabfakovskaya St., Building V, Room 432,
telephone (4932) 38-57-83,
e-mail: V.N.Vinogradov@mail.ru

Барочкин Алексей Евгеньевич,
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,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Aleksei Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building V (B), Room 408,
telephone: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru