

УДК 621.165:621.175

ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКИЙ СПОСОБ ОЧИСТКИ ТРУБОК КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН. ЗАБЫТЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А.

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Нижегород, e-mail: PachurinGV@mail.ru

Целью эксперимента являлось определение эффективности гидропневматического способа очистки трубок конденсаторов турбин турбулизированным водно-воздушным потоком от илистых слабосцепленных и механических отложений и возможность применения ГПСОТ на ходу турбины без изменения эксплуатационного режима работы. В статье приведены основные результаты натурных испытаний гидропневматического способа и использования его в производственных условиях для очистки трубок конденсаторов паровых турбин Т-100-130 и ПТ-60-130 на ТЭУ Горьковского автозавода. Предложенный способ прост в осуществлении, выполняется оперативным путем без изменения эксплуатационного режима работы турбоагрегата. Не требует дополнительных затрат на механическую чистку или реализацию других применяемых на электрических станциях способов, например, химической или шариковой очистки трубок теплообменных аппаратов. Авторы статьи надеются, что предлагаемый материал послужит некоторому оживлению процессов познания и исследований вопросов надежности и экономичности паротурбинных агрегатов и окажет содействие практическому использованию сжатого воздуха для интенсификации теплообмена в аппаратах энергетической отрасли в период восстановления и модернизации промышленности России.

Ключевые слова: конденсаторы паровых турбин, очистка трубок конденсаторов турбин, механические отложения, теплообменные аппараты, сжатый воздух

METHOD HYDROPNEUMATIC TUBE CLEANING STEAM TURBINE CONDENSER. FORGOTTEN EXPERIMENT

Mindrין V.I., Pachurin G.V., Kuzmin N.A.

Nizhny Novgorod State Technical Universit after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,
e-mail: PachurinGV@mail.ru

The purpose of the experiment were to determine the effectiveness of the purification process hydropneumatic tubes turbine condensers turbulize water and air flow from the muddy slabostseplennyh and mechanical deposits and the possibility of using on the go GPSOT turbine without changing the operating mode. The paper presents the main results of the field tests hydropneumatic method and its use in production environments for cleaning condenser tubes of steam turbine T-100-130 and PT-60-130 TEU on Gorky Automobile Plant. The proposed method is simple to implement, performed a surgical procedure without changing the operating mode of the turbine unit. No additional cost for mechanical cleaning or implementation of other used at power plants methods, such as chemical or pipe ball cleaning of heat exchangers. The authors hope that this material will serve as a certain revival of the processes of learning and research issues of reliability and efficiency of steam turbine units and assist the practical use of compressed air for the enhancement of heat transfer in the apparatus of the energy sector in the period of reconstruction and modernization of the industry in Russia.

Keywords: steam turbine condenser cleaning condenser tubes turbines, mechanical deposition, heat exchangers, compressed air

Повышению надежности и безопасности машин и агрегатов в различных условиях эксплуатации посвящены работы многих исследователей [6,8]. Улучшение экономичности эксплуатации производственного энергооборудования и, в частности, паротурбинных агрегатов представляет собой важную задачу современной науки и производства [4,5,7]. Одним из ее направлений является решение вопросов интенсификации теплообмена в теплоэнергетических аппаратах.

В 70-е годы прошлого столетия в планах важнейших работ по развитию теплоэлектроэнергетики, кроме ввода мощных энергоблоков на электростанциях страны, значились работы по сокращению удельных и годовых расходов топлива, в том числе путем повышения эффективности процес-

сов теплообмена в конденсаторах паровых турбин.

В связи с этим на теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) Горьковского автозавода в период расширения станции с вводом энергоблоков мощностью 60 и 100 МВт в феврале 1974 г. был проведен натурный эксперимент в производственных условиях на паровой турбине П-12-29 ст. №2^х) В последствии турбоагрегаты ПТ-12-29 были заменены на более совершенное энергооборудование.

Материалы и методы исследования

Целью эксперимента являлось определение эффективности гидропневматического способа очистки трубок (ГПСОТ) конденсаторов турбин турбулизированным водно-воздушным потоком от илистых слабосцепленных и механических отложений и возможность применения ГПСОТ на ходу турбины без изменения эксплуатационного режима работы. Суш-

ность эксперимента заключалась в подаче сжатого воздуха в поток циркуляционной воды, поступающей в трубки конденсатора для охлаждения отработанного пара в турбине.

Обычно очистка внутренней поверхности трубок в конденсаторах турбин ТЭЦ ГАЗ проводилась ремонтным персоналом механическими ершами – шомполом, что вызывало необходимость отключения и вывода в ремонт секции конденсатора с разгрузкой турбины и снижением электрической мощности. Трубки конденсаторов, особенно трубки второго хода, заносились илистыми и песчаными отложениями толщиной от 0,5 до 2 и более мм. Занос трубок отложением приводил к ухудшению теплообмена, снижению вакуума в конденсаторе и располагаемого теплоперепада в части низкого давления (ЧНД) турбины. В результате чего уменьшается мощность турбины и выработка электрической энергии на станции.

В проводимом эксперименте подвод сжатого воздуха в конденсатор (рис. 1) осуществлялся во входную 3 и поворотную 4 камеры секции конденсатора из магистрали сжатого воздуха 10 с давлением 0,6 МПа посредством трубопровода 11 Ду50 с регулирующими вентиляторами Ду30 в количестве

$$G_g = 0,44 \frac{\text{М}^3}{\text{с}},$$

что составляет 25% от объемного расхода циркуляционной воды в количестве равном

$$W = 1,75 \frac{\text{М}^3}{\text{с}}$$

(см. приведенные расчеты).

Регулирование расходом циркуляционной воды в конденсатор турбины осуществлялось из проточной системы охлаждения прикрытием задвижки 8 на входе воды в конденсатор при полностью открытой задвижке 9 на выходе воды. Температура воды в напорных циркуляционных трубопроводах в период испытания была равной $t_g = -12^\circ\text{C}$.

Для поддержания сифона и создания разряжения в сбросном трубопроводе 7 с целью надежного отсоса отработанного воздуха из выходной камеры 5 в работу был включен эжектор циркуляционной системы 14.

Подача сжатого воздуха в секцию конденсатора осуществлялась в течении 4-х часов при этом поддерживались постоянными и контролировались следующие эксилиатационные параметры на турбине:

- расход острого пара в турбину $G_o = 130 \text{ т/ч}$ (36,1 кг/с);
- давление острого пара $P_o = 29 \text{ атм}$ (0,3 МПа);
- температура острого пара $t_o = 400^\circ\text{C}$ (673 К);
- расход пара в производственный отбор ($P_{om} = 0,65 \text{ МПа}$) $G_{om} = 110 \text{ т/ч}$ (30,5 кг/с);
- расход пара в конденсатор $G_k = 20 \text{ т/ч}$ (5,5 кг/с);
- электрическая мощность турбогенератора перед началом эксперимента $N_{эл} = 11,2 \text{ МВт}$ (11200 кВт);
- уровень вакуума в конденсаторе перед началом эксперимента $H = 732 \text{ мм рт.ст.}$

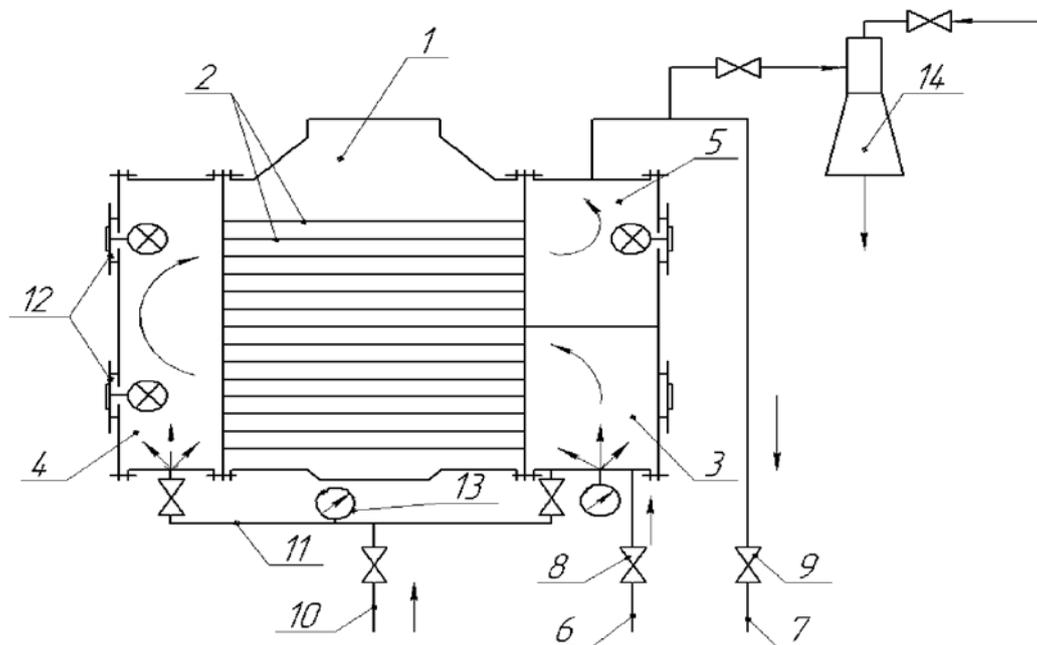


Рис. 1. Конденсатор паровой турбины:

1 – паровое пространство конденсатора; 2 – турбинная система конденсатора; 3 – входная камера; 4 – поворотная камера; 5 – выходная камера; 6 – напорный трубопровод охлаждающей воды; 7 – сбросной трубопровод; 8 – задвижка на входе воды; 9 – задвижка на выходе воды; 10 – магистраль сжатого воздуха; 11 – трубопровод подвода сжатого воздуха; 12 – смотровые люка с электрической подсветкой; 13 – манометры; 14 – эжектор циркуляционной системы

В ходе эксперимента электрическая мощность контролировалась по ваттметру – штатному прибору на щите управления турбоагрегатом и контрольному прибору на главном щите ТЭЦ.

Уровень вакуума в конденсаторе отслеживается по шкале ртутного прибора и фиксировался на диаграмме самописного прибора N3003122 завода «Тизприбор». Фрагмент записи диаграммы занесен на (рис. 2).

Для осуществления визуального контроля процесса чистки трубок водо-воздушным потоком в водяных камерах конденсатора были смонтированы прозрачные смотровые люки с электрической подсветкой.

Подача сжатого воздуха во входную камеру левой секции конденсатора турбины П-12-29 ст. №2 осуществлялась в течении 4-х часов и сопровождалось:

- повышением вакуума H в конденсаторе 4 снижением температуры отработанного пара t_k в паровом пространстве конденсатора 1;
- постепенным увеличением электрической мощности на зажимах турбогенератора, $N_{эл}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений параметров H и $N_{эл}$ занесены на (рис. 2), из которого можно видеть:

- подача сжатого воздуха вызвала повышение вакуума в конденсаторе

на 20 мм.рт. ст. (с 732 мм. рт. ст. т. А до 752 мм. рт. ст. т. С см. рис. 2), что привело к понижению давления в конденсаторе с 3,73 кПа до 1,067 кПа [10];

– увеличение электрической мощности турбогенератора составила 300 кВт (с $N_{эл} = 11200$ кВт т. F до 11500 кВт т. N) (см. рис. 2);

– наиболее интенсивный рост параметров H и $N_{эл}$ наблюдался в начальный период подачи воздуха в течение первого часа.

Таким образом, повышение вакуума (или снижение абсолютного давления в паровом пространстве конденсатора) и увеличение электрической мощности произошло в результате очистки внутренних поверхностей трубок в конденсаторе турбулизированным водо-воздушным потоком от органических отложений и механических взвесей придонного песка.

Интенсификация теплообмена в конденсаторе привела к увеличению располагаемого теплоперепада в части низкого давления турбины на величину $\Delta H_o = 66$ кДж / кг (см. рис. 3) и подъему электрической мощности турбогенератора на 300 кВт (см. расчет).

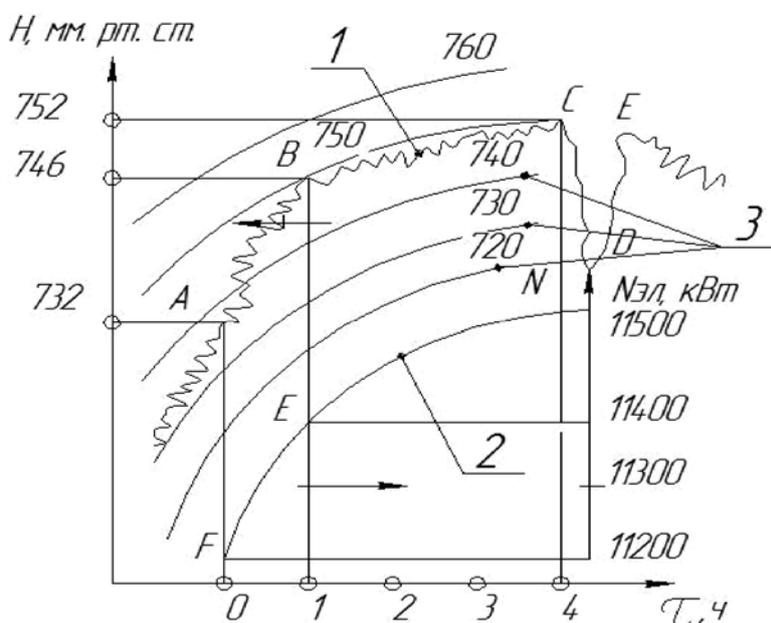


Рис. 2. Фрагмент диаграмм самописного прибора-вакууметра турбины П-12-29 ТЭЦ ГАЗ: 1 – увеличение вакуума в конденсаторе при подаче сжатого воздуха; 2 – увеличение мощности турбогенератора; 3 – вакууметрические линии; H – уровень вакуума в конденсаторе; τ – время подачи сжатого воздуха в конденсатор

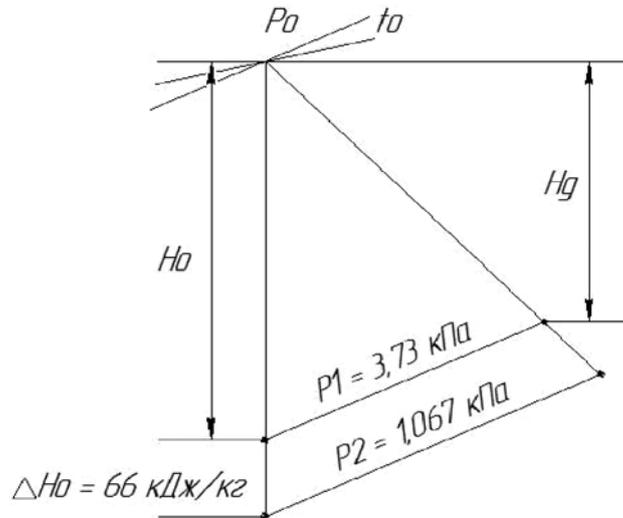


Рис. 3. Расширение пара в ЧНД турбины:

H_0 – располагаемый теплорезерв в части низкого давления турбины П-12-29, кДж/кг;
 H_g – действительный теплорезерв, кДж/кг; $\Delta H_0 = 66$ кДж/кг – увеличение располагаемого теплорезерва; $P_1 = 3,73$ кПа – давление в конденсаторе до подачи сжатого воздуха; $P_2 = 1,067$ кПа – давление в конденсаторе после подачи сжатого воздуха

Процесс очистки и вынос отложений из трубок сопровождался сильным помутнением водо-воздушной смеси и наблюдался через прозрачные смотровые люки.

Резкое падение вакуума до $H=720$ мм рт. ст. (т. Д на рис. 2) объясняется выводом в ремонт секции конденсатора, которая подверглась испытанию, для осмотра состояния трубок после их очистки гидропневматическим способом. Осмотр показал практическое отсутствие отложений и механических взвесей придонного песка из реки Оки в трубках. Небольшие слизистые отложения толщиной до 0,1...0,2 мм оставались в трубках с выходных сторон первого и второго ходов секции конденсатора.

После осмотра трубок и водяных камер и включения секции конденсатора в работу произошел подъем вакуума до величины 750 мм рт.ст., длительное время оставался неизменным.

Для количественной оценки эффективности гидропневматического способа потребовалось выполнение следующих расчетов.

Расход циркуляционной воды, поступающей в секции конденсатора для охлаждения трубок $\varnothing 22 \times 1$, выполненных из сплава ЛО-70, определен по известной формуле [1]

$$W = VF \cdot 3600 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (1)$$

где V – скорость циркуляционной воды в открытой задвижке напорного привода, м/с; F – площадь сечения в задвижке $D_y 800$, м²

Скорость циркуляционной воды найдем из условия перепада давления в задвижке равным $\Delta p = 0,3 \cdot 10^5$ Па

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ м/с} \quad (2)$$

где $\rho = 1000$ кг / м³ – плотность воды.

Отсюда:

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,3 \cdot 10^5}{1000}} = 7,45 \text{ м/с.}$$

Площадь сечения F в задвижке открытой на 30% составила величину равную $F = 0,235$ м².

Тогда

$$W = 7,45 \cdot 0,235 \cdot 3600 = 6302 \text{ м}^3/\text{ч} (1,75 \text{ м}^3/\text{с})$$

Расход сжатого воздуха G_g , подаваемого в поток циркуляционной воды через постоянно открытый вентиль $D_y 30$ мм, определен из условия неразрывности потока $G_g = CF \cdot 3600$ м³/ч, где C – скорость истечения сжатого воздуха в адиабатном процессе расширения найдена по формуле из [1]:

$$C = \sqrt{2 \frac{K}{K+1} P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]}, \text{ м/с} \quad (3)$$

где $K=1,4$ – показатель адиабаты; $P_1 = 6 \cdot 10^5$ Па – давление сжатого воздуха

в магистрали ТЭЦ; $P_2 = 0,2 \cdot 10^5$ Па – давление в водяном пространстве конденсатора; V_1 – удельный объем сжатого воздуха при $P_1 = 6 \cdot 10^5$ Па, и температуре $T_1 = 313$ К ($t = 40^\circ\text{C}$), определенный из уровня Клапейрона:

$$V_1 = \frac{RT_1}{P_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (4)$$

Здесь $R = 287$ кДж/кг·К – газовая постоянная для воздуха [9].

$$V_1 = \frac{287 \cdot 313}{6 \cdot 10^5} = 0,15, \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Подставляем найденные величины в формулу (3), получим:

$$C = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} 6 \cdot 10^5 \cdot 0,15 \left[1 - \left(\frac{0,2 \cdot 10^5}{6 \cdot 10^5} \right)^{0,28} \right]} = 622,4 \text{ м/с}.$$

Площадь сечения в открытом вентиле D_y 30 мм равна величине $F = 706 \cdot 10^{-6}$, м².

Расход сжатого воздуха в проведенном опыте был равен:

$$G_g = 622,4 \cdot 706 \cdot 10^{-6} \cdot 3600 = 1582 \text{ м}^3/\text{ч} \\ (0,44 \text{ м}^3/\text{с}).$$

Из полученных результатов следует: очистка трубок в конденсаторе турбины П-12-29 осуществлялась подачей сжатого воздуха в количестве $G_g = 0,44$ м³/с, что составляло 25% от объемного расхода циркуляционной воды в секции конденсатора в количестве $W = 1,75$ м³/с.

Таким образом, результатом опытной проверки эффективности гидропневматического способа очистки трубок конденсатора турбины П-12-29 явилось повышение вакуума в конденсаторе и увеличение электрической мощности турбогенератора. Величина подъема мощности <<nindr40.wmf>> по ваттметру на 300 кВт подтвердилась расчетом [10]:

$$\Delta N = G_\kappa \Delta H_o \eta_{oi} \eta_m, \text{ кВт}, \quad (5)$$

где $G = 5,5$ кг/с – расход пара в конденсаторе; $\Delta H_o = h_1 - h_2$, кДж/кг – увеличение располагаемого теплоперепада в ЧНД турбины (см. рис. 3); $h_1 = 2572$ кДж/кг – энтальпия отработанного пара при $H_1 = 732$ мм.рт. ст. ($P_1 = 3,73$ кПа), [10]; $h_2 = 2514$ кДж/кг – энтальпия отработанного пара при $H_2 = 752$ мм.рт. ст. ($P_2 = 1,067$ кПа); $\eta_{oi} = \frac{H_g}{H_o} = 0,85$ – относительно – внутренней КПД ЧНД турбины, (см. рис. 3);

$\eta_m = 0,95$ – механический КПД турбины и генератора.

Подстановка внутренних величин дает:

$$\Delta N_{эл} = 5,5 (2572 - 2514) 0,85 \cdot 0,95 = 296 \text{ кВт}.$$

Результат расчета сравним с величиной прироста мощности $\Delta N_{эл} = 300$ кВт, полученный в опыте (не совпадение $\delta = 12\%$).

Возможность подъема мощности на турбине означает возможность создания экономии электрической энергии на станции $W_{эл}$. В данном примере экономия $W_{эл}$ составляла величину:

$$W_{эл} = \Delta N \tau K, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (6)$$

где $\tau = 8500$ ч – время работы турбины в течении года; $K = 0,5$ – коэффициент исполь-

зования технического решения ГПОСТ; $\Delta N_{эл} = 295$ кВт – подъем электрической мощности при использовании ГПОСТ

$$W_{эл} = 295 \cdot 8500 \cdot 0,5 = 1253750 \text{ кВт} \cdot \text{ч в год}.$$

В последующие годы на ТЭЦ ГАЗ проводились подобные испытания, и осуществлялось практическое применение гидропневматического способа очистки трубок в конденсаторах КГ2-6200-1 и 50-КЦС-4 паровых турбин Т-100-130 и ПТ-60-130.

Кроме результатов, подтверждающих эффективность процесса чистки трубок описываемым методом, были получены дополнительные данные о применимости способа и продолжительности процесса очистки в течение 20-30 минут с использованием перфорированных и раздающих устройств, а так же о коррозионной стойкости материалов трубок, трубных насадок и камер конденсаторов при омывании их водо-воздушной смесью. Во всех опытах эффективность очистки достигалась от илистых органических отложений и донного песка и з реки Оки, при следующем химическом составе: $\text{SiO}_2 - 35,9\%$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 15,6\%$; $\text{Al}_2\text{O}_3 - 3,5\%$; $\text{CuO} - 11,4\%$; $\text{SO}_3 - 1,7\%$; $\text{Ca} + \text{Mg} 1,6\%$; органические соединения $\uparrow \text{O} - 35,4\%$.

Выводы

Таким образом, итоги накопленного опыта, полученного при натурных испытаниях и практическом использовании гидропневматического способа очистки трубок в конденсаторах турбин малой и средней

мощности, привели к следующим выводам и практическим рекомендациям.

1. Во всех случаях эффективность использования гидропневматического способа очистки трубок (ГПСОТ) в конденсаторах турбин достигалась подачей сжатого воздуха в количестве 15-20% от объемного расхода циркуляционной воды, поступающего на охлаждение в конденсатор;

2. Качество очистки трубок турбулизированным водо-воздушным потоком повышается при использовании раздающих устройств, способствующих формированию воздушных пузырьков и равномерному их распределению по трубкам. Как показали эксперименты, наиболее эффективным оказалось устройство раздачи воздуха спирального типа с перфорирующими отверстиями диаметром 4 мм и шагом 60 мм [2,3];

3. Описанный способ прост в осуществлении, выполняется оперативным путем без изменения эксплуатационного режима работы турбоагрегата. Не требует дополнительных затрат на механическую чистку или реализацию других применяемых на электрических станциях способов, например, химической или шариковой очистки трубок теплообменных аппаратов;

4. Возможность и целесообразность применения ГПСОТ в конденсаторах турбин средней и высокой мощности с проточной или замкнутой системой охлаждения могут быть определены после тщательного анализа трассировки водо-воздушного потока в циркуляционной системе с выходом воздуха в атмосферу, а также после оценки коррозионной стойкости материалов трубок, трубных досок и водяных камер конденсаторов при омывании их водо-воздушной смесью;

5. На электростанциях при наличии компрессорного оборудования с вы-

работкой сжатого воздуха в количестве $G_k = 20000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($6 \text{ м}^3/\text{с}$) возможно чередование способов ГПСОТ и процесса термической сушки отложений на отключенной секции конденсатора подачей сжатого воздуха с $t = 40 - 60^\circ\text{C}$ в водяные камеры с выходом воздуха в атмосферу через открытые смотровые люки.

Список литературы

1. Кириллин А.Д., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика – М.: Наука, 1979. – 512 с.
2. Миндрин В.И. Гидропневматический способ очистки трубок конденсатора турбины Т-100-130 / Информационный листок №258-85: НГТУ – Н. Новгород, 1985.
3. Миндрин В.И. Система очистки внутренних поверхностей теплообменных аппаратов // Авторское свидетельство № 1726972, 1991. Бюл. № 14.
4. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Иняев В.А. Производственная безопасность: комплекс учебно-методических материалов. – Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. П.Е. Алексеева, 2008. – 148 с.
5. Миндрин В.И., Пачурин Г.В., Ребрушкин М.Н. Вихревая труба в системе консервации и расхолаживания паровых турбин // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2; – URL: www.science-education.ru/116-12487 (дата обращения: 11.04.2015).
6. Пачурин Г.В., Галкин В.В., Власов В.А., Меженнин Н.А. Усталостное разрушение при разных температурах и долговечность штампованных металлоизделий: монография / Г.В. Пачурин [и др.]; под общей ред. Г.В. Пачурина. – Н. Новгород: НГТУ, 2010. – 169 с.
7. Пачурин Г.В., Миндрин В.И. Безопасность технологических процессов и оборудования. Монография. – Издатель LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Germany. 2013. – 149 с. (№ ISBN: 978-3-659-41086-4).
8. Пачурин Г.В. Коррозионная долговечность изделий из деформационно-упрочненных металлов и сплавов: Учебное пособие. – 2-е изд., доп. – СПб.: Издательство «Лань», 2014. – 160 с.: ил. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
9. Теплотехнический справочник, т. 1; Под ред. В.Н. Юренина и П.Д. Лебедева – М.: Энергия, 1975. 744 с.
10. Трухний А.Д. Стационарные паровые турбины – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 640 с.