

УДК 612.165 : 311.25 : 621.039

И.Г. ШЕЛЕПОВ, канд. техн. наук, проф.,
М.А. САФРОНИУК, магистр теплоэнергетики

Украинская инженерно-педагогическая академия (УИПА)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ОТЛОЖЕНИЙ В ТРУБНЫХ ПУЧКАХ

Діагностика вакууму в конденсаторах в темпі процесу по виробленню електроенергії – одна з актуальних задач при експлуатації енергоблоків. Авторами показана можливість вдосконалення технічної діагностики поточного вакууму конденсатора, за рахунок уточнення величини термічного опору.

Diagnostics of vacuum in condensers in the rate of process on making of electric power is one of actual tasks during exploitation of power units. Authors show possibility of perfection of technical diagnostics of current vacuum of condenser, due to clarification of size of thermal resistance.

Состояние вопроса. Диагностика вакуума в конденсаторах в темпе процесса по выработке электроэнергии – одна из актуальных задач при эксплуатации энергоблоков.

Вакуум зависит от многих факторов, основные из которых в общем виде можно представить выражением [1]:

$$p_K = f(\delta, t_{1B}, D_K, W, G_{B3}, \tau), \quad (1)$$

где $\delta, t_{1B}, D_K, W, G_{B3}, \tau$ – соответственно: фактор чистоты поверхности охлаждения; температура охлаждающей воды на входе в конденсатор, $^{\circ}\text{C}$; паровая нагрузка конденсатора, кг/с; расход охлаждающей воды, кг/с; присосы воздуха, кг/с; время работы турбоустановки, считая от последнего ППР, час.

Пока не найдено аналитического решения выражения (1) и задача его раскрытия решается в эмпирической постановке.

В работе [1] показано, что для расчета текущего вакуума в конденсаторе может быть использован полином второй степени и приводится пример уравнения регрессии для турбоустановки Т-100-130. В этом уравнении регрессии не учитывается фактор чистоты поверхности охлаждения в явном виде в виду трудностей его определения.

Из теории статистических вычислений известно, что степень полинома аппроксимации определяется количеством независимых аргументов, учтенных при составлении уравнения регрессии. На практике, стараются уравнению регрессии приводить к линейному виду. Это существенно упрощает дисперсионный анализ. Одним из наиболее эффективных методов линейной аппроксимации является полнота учета независимых аргументов, влияющих на процесс.

Для конденсаторов линейность полинома уравнения регрессии p_K по выражению (1), может быть достигнута при учете в явном виде фактора изменения термического сопротивления трубного пучка в результате загрязнения трубок отложениями.

Цель работы.

1. Уточнить количественное значение коэффициента теплопроводности отложений, загрязняющих трубный пучок конденсаторов со стороны, охлаждающей воды.

2. Показать региональную идентичность условий образования загрязнений в трубках конденсаторов мощных ТЭС и АЭС.

3. Указать значения физико-химических характеристик отложений для практического использования и сравнения с местными условиями.

Условия формирования отложений в конденсаторах. В литературе по теплоэнергетике загрязнения трубок конденсаторов рекомендуется определять на каждой электростанции по данным практики [1-3]. Блочная структура мощных ТЭС и АЭС и продолжительные наблюдения за эксплуатационными параметрами работы энергоблоков дают основания на пересмотр этой точки зрения.

Эффективная работа энергоблоков мощных ТЭС и АЭС возможна при создании вакуума в конденсаторах, который обычно находится в пределах $3,5 \leq p_k \leq 7,0$ кПа, что соответствует температурам пара выхлопа турбин $27 \leq t_k \leq 38$ °С.

Трубные пучки конденсаторов, применяемых на Украинских ТЭС и АЭС, изготавливают из сплава МНЖ-5-1 с диаметром трубок, равным 26/24, 28/26 мм.

Теловой расчет конденсаторов регламентирован государством и выполняется по методики изложенной в [3]. Согласно этой методике скорость движения воды в трубке может находиться в пределах $1,5 \leq w \leq 2,5$ м/с.

Для этих условий число Рейднольса, будет составлять $3 \cdot 10^4 \leq Re \leq 7 \cdot 10^4$.

Конденсаторы мощных ТЭС и АЭС отличаются большой площадью охлаждения, составляющей $15000 \leq F \leq 35000$ м². Огромные объемы природной воды (до 60000 м³/ч на один конденсатор), необходимые для обеспечения процесса конденсации пара, исключают возможность очистки охлаждающего потока от мелких взвесей (крупностью менее 2 мм).

Таким образом, загрязнение трубок конденсаторов отложениями происходит из взвесей потока с развитым турбулентным движением и, практически, в изотермическом процессе. Интенсивность образования отложений в этом случае будет зависеть от продолжительности работы конденсатора между чистками системы охлаждения и от физико-химических свойств природной воды

Условия образования взвесей в охлаждающей воде. Поток охлаждающей воды в трубке конденсатора, несущий твердые примеси в виде частиц взвеси, является двухфазной системой. При гидродинамическом взаимодействии сплошной (вода) и дисперсной (частицы взвеси) сред возникает особая гетерогенная система, свойства которой существенно отличаются от свойств ее компонентов.

Образование взвесей, как компонента гетерогенной системы, в природной воде водоемов-охлаждающих определяется содержанием в этих водах кальция, магния и натрия. Из теории лимнологии следует [4], что основными источниками взвесей являются два природных физико-химических процесса:

- первый – химический процесс перехода в осадок слаборастворимых, или нерастворимых солей кальция и магния из гидрокарбонатов, сульфатов и хлоридов;
- второй – физико-химическое разрушение и вымывание наиболее распространенных в природе осадочных пород, например, мрамора (CaCO₃),

известняка (CaCO_3), доломита (CaCO_3 , MgCO_3) и др., а также изверженных пород, например, кварцевого песка (SiO_2), гранита.

Известно [5], что сформировавшиеся таким образом взвеси, представляют собой широкую гамму полидисперсных образований, величина частиц которых колеблется от коллоидных размеров до макрочастиц.

По классификации О.О. Алекина [4] большинство крупных и малых рек, а также озер и водохранилищ Украины, как и Европы, относятся к классу гидрокарбонатных вод.

В настоящее время экосистема практически всех водоемов-охладителей крупных ТЭС и всех АЭС Украины динамически оформилась и относится к гидрокарбонатному классу, включающему в себя группу кальция смешанного типа II, или $\text{C}_{II}^{\text{Ca}}$ [4]. Поэтому преобладающим источником взвесей в водоемах-охладителях является выпадающие в осадок карбонаты кальция (CaCO_3) и, частично, кальция и магния (Ca , $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$).

Для сравнения химического состава природной воды водоемов-охладителей различных ТЭС и АЭС в табл. 1. приведен состав воды пруда охладителя ЗАЭС.

Анализ данных природной воды пруда-охладителя по годам показывает о динамическом постоянстве химического состава.

Таблица 1. Химический состав воды пруда-охладителя в месте заборов циркуляционными насосами конденсаторов К-33160 ЗАЭС (сокращенный вариант)

№	Наименование показателей	Единицы измерен.	Год					
			2002	2001	2000	1999	1998	1997
1	рН	ед рН	8.6	8.66	8.61	8.48.	8.47	8.41
2	Температура	$^{\circ}\text{C}$	21.38	22.99	22.44	22.82	22.47	21.9
3	Жесткость карбонатная	мг.екв/дм ³	3.34	3.3	3.2	3.17	3.2	3.2
4	Калий	мг /дм ³	5.89	5.71	5.23	5.13	4.96	5.43
5	Кальций	мг /дм ³	56.28	56.08	53.43	53.6	54.25	51.12
6	Магний	мг /дм ³	19.85	18.53	20.07	20.09	23.77	22.03
7	Солесодержание	мг /дм ³	430.53	410.1	404.5	401.03	408.17	402.3

Теплопроводность отложений. Термическое сопротивление слоя отложений R_3 рассчитывается по формуле, известной из теории теплопередачи [6]:

$$R_3 = \delta_3 / \lambda_3, \quad (2)$$

где δ_3 – толщина соля отложений, м; λ_3 – коэффициент теплопроводности отложений, Вт/(м К).

Вариант методики определения δ_3 рассмотрен в работе [7]

Коэффициент теплопроводности – основной параметр, количественное значение которого определяет точность поверочного расчета в процессе теплопередачи.

В технической литературе, в т.ч. и учебной, отложения часто поименованы как карбонатная «накипь». С физико-химической точки зрения накипь – вещество, имеющее коагуляционную структуру. Накипь образуется в процессе нагревания воды и

формирование ее из природной воды возможно при температурах более 40 °С [7]. Таким образом, в условиях работы конденсаторов мощных ТЭС и АЭС, образование накипи в трубках невозможно в принципе (по условиям температурного режима).

Вместе с тем в литературных источниках при проведении расчетов теплопередачи в конденсаторах используются табличные значения накипи, которые в справочной литературе, например, в [6] задаются интервалом $0,15 \leq \lambda \leq 2,3$ Вт/(м К). Обычно выбираются значения $1 \div 2$ Вт/(м К), как правило, без обоснования численного значения величины. Это чревато субъективностью в тепловых расчетах конденсаторов, т.к. из интервала чисел, растянутого более чем на порядок, можно получить любой результат.

В работе [7] показано, что отложения в конденсаторах мощных ТЭС и АЭС имеют аллювиальное происхождение. Естественно, что коэффициент теплопроводности аллювиальных отложений может существенно отличаться от коэффициента теплопроводности накипи в сторону увеличения параметра.

В справочной литературе по тепло-физическим свойствам материалов не удалось выявить значения коэффициента теплопередачи для аллювиальных отложений, подобных тем которые формируются в трубках конденсаторов мощных ТЭС и АЭС. Вероятно, что возможность получения сведений о значениях теплофизических свойств отложений в справочной литературе – перспектива неопределенного будущего. Причин для такого пессимистического прогноза несколько. Назовем основные.

Отложения – кристалло-аморфное вещество. Теплопроводность подобных материалов определяется частично электронами в зоне проводимости, но в основном фононами, представляющими собой энергию колебательных состояний решетки вещества. Пока не найдено аналитического и сколько-нибудь приемлемого полуэмпирического решения теплопроводности подобных веществ [8, 9]. Кроме того, существуют сложности и при экспериментальных способах определения теплопроводности, которые подробно рассмотрены в [8]. При этом, указывается, что если удастся получить результат теплопроводности, при определении ее различными методами, с разбросом параметров $20 \div 30\%$, то эти отклонения считаются вполне приемлемыми [8, 9]. Таким образом, задача определения коэффициента теплопроводности аллювиальных отложений в конденсаторах мощных ТЭС и АЭС – есть, а ее решения пока не найдено.

В работе [7] показан вариант решения этой задачи – учета термического сопротивления слоя отложений с помощью «Методики поверочных расчетов текущего вакуума, учитывающей состояние чистоты поверхности охлаждения конденсатора» («Методике ...»), для конденсаторов К-33160 в условиях ЗАЭС эмпирическим путем.

Сравнение расчетных данных вакуума по «Методике ...» с данными практики по КИП в частных случаях показано на рис. 1.

Возможность адаптации «Методики ...» для условий, отличных от условий ЗАЭС – одна из целей настоящей работы.

Преодоление сложностей связанных с определением термического сопротивления отложений в условиях конкретных ТЭС и АЭС возможно преодолеть, по нашему мнению, следующими вариантами подхода к решению этой задачи:

1 вариант – использование эмпирических формул из ряда зависимостей $\lambda_3 = f(\rho)$, приведенных в [9], где ρ – плотность вещества.

2 вариант – определение λ_3 методом итераций для, например, конденсатора К-33160 ЗАЭС в момент времени, когда точно известна толщина слоя отложений δ_3 , т.е. при остановке энергоблоков на очередной ППР.

3 вариант – подбор для отложений природных аналогов с известными справочными значениями химического состава вещества, плотности и пористости.

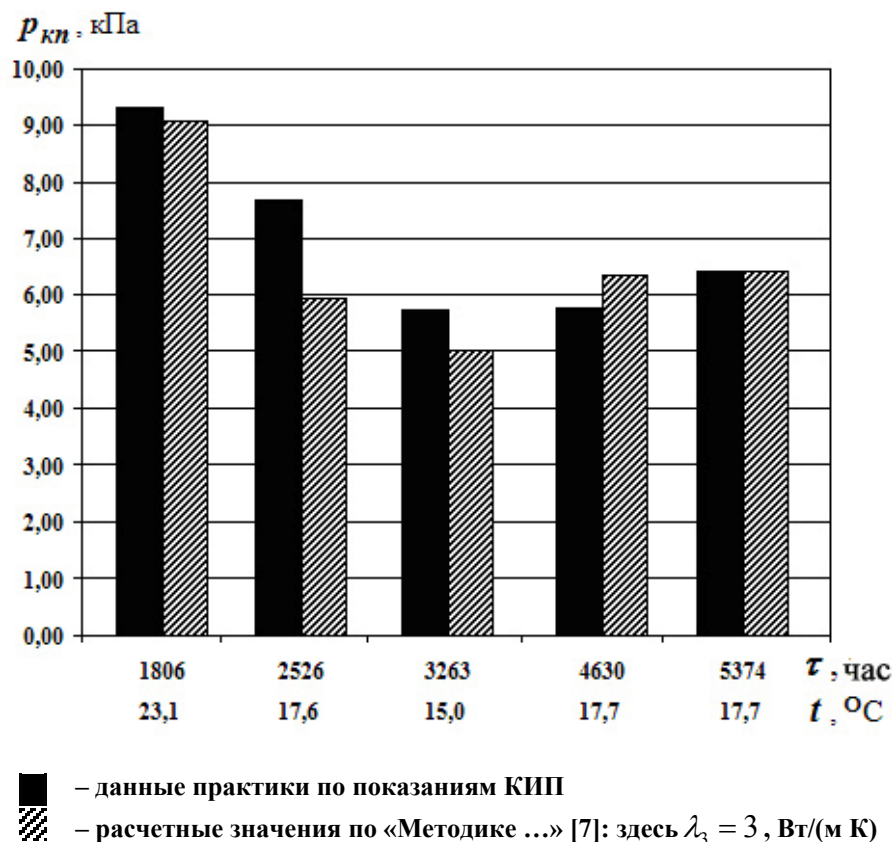


Рис. 1. Сравнительная гистограмма вакуума в конденсаторах К-33160 ЗАЭС

Для достижения целей 2 и 3, сформулированных в настоящей работе, рассмотрим последовательно методы определения коэффициента теплопроводности по каждому из этих вариантов.

Вариант 1. Известно, что теплопроводность (коэффициент теплопроводности) сложных, неорганических, твердых, связанных материалов определяется следующими характеристиками [6, 8, 9]:

- структурой вещества;
- плотностью и пористостью структуры;
- химическим составом вещества;
- влажностью и температурой среды, окружающей вещество.

Структура вещества отложений исследована с помощью компьютерных технологий нами [7], а также многолетними визуальными наблюдениями сотрудников водно-радио-химической лаборатории (ВРХЛ) ЗАЭС.

Исследовались образцы отложений в трубках, извлеченных конденсаторов при ППР и высушенных в естественных условиях (при комнатной температуре). В результате этих исследований установлено. Отложения – плотная конденсационная структура с явно выраженными кристаллическими образованиями на изломах. Видимых органических включений, а так же пор (увеличение на мониторе – 50 раз, при рассмотрении в микроскоп до 130 раз) не установлено. Установлена развитая техническая шероховатость поверхности отложений (абсолютная величина выступов

$\Delta a = 0,09 \pm 0,005$ мм). В нормальном сечении трубки слой отложений имеет вид кольца, толщина которого колеблется в пределах $0,7 \leq \delta_3 \leq 1,1$ мм. При этом коэффициент водопроницаемости составил $0,05 \div 0,1$ м/сут. Степень водопроницаемости (по Коржуку) – группа II – проницаемые в ничтожной степени. Слой отложений плотно сцеплен с металлом трубки.

Химический состав отложений представлен в табл. 2 [10].

Таблица 2. Химический состав отложений в трубках конденсаторов К-33160 ЗАЭС (обобщенный результат)

Годы ППР	№№ блоков	Химический состав отложений в пересчете на окислы, %					Примечание
		\sum Ca/Mg	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CuO	п.п.п.	
2001	1	89,78	0,27	0,59	0,3	-13,87	
1991 - 2004	1-6	93,41	0,31	1,47	0,36	-11,63	средние значения (из более 200 проб)

Плотность и пористость отложений. Плотность твердого вещества ρ , г/см³ (кг/м³), зависит от его пористости (скважности) и определяется выражением:

$$\rho = \frac{m_{\text{сух}}}{V}, \quad (3)$$

где $m_{\text{сух}}$ – масса твердых частиц вещества – скелета вещества (абсолютно сухого вещества, высушенного при температуре 105-107 °С), г; V – объем вещества, см³.

Пористость вещества ε выражается отношением объема пустот (пор) $V_{\text{пор}}$ к общему объему вещества, обычно в процентах:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V} \cdot 100, \% \quad (4)$$

Результаты исследований плотности и пористости приведены в табл. 3. Составление столбцов табл. 3 ясно из заголовков.

Коэффициент теплопроводности подсчитан по одной из эмпирических зависимостей вида $\lambda_3 = f(\rho)$, Вт/(м К). Формула этой зависимости экспериментально получена для веществ, приближающихся по структуре, химическому составу и плотности к отложениям, и приведена в [9]:

$$\lambda = (0,11 \cdot \rho^{1,1} \cdot 1,68 \cdot \rho + 0,22) \cdot K \cdot \alpha, \quad (5)$$

где $K = 1,163$ [7] – коэффициент перевода величины λ в систему единиц (СИ); $\alpha = (2 \div 3)$ [7] – коэффициент учитывающий влажность окружающей среды отложений;

Таблица 3. Пористость и плотность отложений в конденсаторах ТЭС и АЭС

№ отрезка-образца трубки	Масса сухой чешуйки, $m_{сух}$, Г	Масса влажной чешуйки, $m_{вл}$, Г	Объем вытесненной жидкости, V_v , см ³	Пористость, ε , %	Плотность, ρ , кг/м ³
1-й ход воды конденсаторов К33160 ЗАЭС					
<i>среднее по 20 образцам</i>	1,101	1,158	0,0563	12,04	2590,87
2-й ход воды конденсаторов К33160 ЗАЭС					
<i>среднее по 12 образцам</i>	1,108	1,165	0,0572	11,99	2600,96
Конденсатор К-15240 Змиевская ТЭС					
<i>среднее по 9 образцам</i>	1,116	1,156	0,040	8,126	2608,46

Подставив в формулу (5) среднее значение $\rho_3 \approx 2,6$ г/см³ (см. табл. 3), $\alpha = 2$ получим значение коэффициента теплопроводности аллювиальных отложений по варианту № 1 $\lambda_3 \approx 3,7$ Вт/(м К).

Вариант 2. λ_3 определено методом итераций для конденсаторов К-33160 ЗАЭС при известных толщинах слоя δ_3 , измеренных при остановках блоков на очередные ППР. Необходимые данные для процедур итерации были получены с использованием «Методики ...» [7]. Среднее значение λ_3 по варианту 2 составило $\lambda_3 \approx 3,2$ Вт/(м К).

Вариант 3. Прогноз численных значений коэффициента теплопроводности аллювиальных отложений для конденсаторов мощных ТЭС и АЭС по варианту 3 приведен в сравнительной табл.4.

Таблица 4. Физико-химические и термические характеристики материалов, являющиеся аналогами по [7, 9] к слою аллювиальных отложений в конденсаторах К-33160 ЗАЭС

Материал	Химический состав	Температура окружающей среды, °С	Пористость ε , %	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м К)
Конденсационные структуры					
Мрамор	CaCO ₃	0	0,53-13,4	2100-2800	3,5-5,0
Известняк	CaCO ₃	100-300	0,53-14,0	2600-2840	2,3
Коагуляционные структуры					
Котельная накипь, богатая известью	CaCO ₃	100	30,0-60,0	1000-2500	0,15-2,3
Прогноз коэффициента теплопроводности отложений					
Отложения аллювиальные	CaCO ₃	20	8,0-12,0	2550-2650	3,0-4,0

Выводы.

1. Показано, что в трубках конденсаторов мощных ТЭС и АЭС аллювиальные отложения по химическому составу на 90 ÷ 95 % представлены карбонатами кальция (CaCO_3) и частично кальция и магния (Ca , $\text{Mg}(\text{CO}_3)_2$).

2. Установлено, что теплопроводность отложений находится в пределах $3,0 \leq \lambda_3 \leq 4,0$ Вт/(м К).

3. Показано, что условия для процесса формирования отложений в конденсаторах мощных ТЭС и АЭС по регионам Украины практически одинаковы, как по составу природных вод, так и по технологическим параметрам эксплуатации оборудования.

4. Установлены количественные показатели основных источников загрязнений трубок конденсаторов, позволяющие сравнивать результаты, полученные на ЗАЭС с местными условиями мощных ТЭС и АЭС.

5. Показана возможность совершенствования технической диагностики текущего вакуума конденсатора в сравнении с существующими за счет уточнения величины термического сопротивления.

Литература

1. Шелепов И.Г., Заруба В.К., Яцкевич С.В. Теплоэнергетические установки электростанций (исследование и расчет низкопотенциальных комплексов ТЭС и АЭС). – К.: УМК ВО, 1993. – 200 с.

2. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергия, 1987. – 328 с.

3. Берман Л.Д., Зернова Э.П. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций. – М.: Союзэнерго, 1982. – 106 с.

4. Романенко В.Д. Основи гідроекології: підручник. – К.: Обереги, 2001 – 728 с.

5. Колмогоров А.В. О логарифмически - нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. Доклады АН СССР, том 31, №2. 1941 – с. 99-101.

6. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 419 с.

7. Сафронюк М.А. Влияние состояния поверхностей теплообмена на вакуум в конденсаторах паровых турбин // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования: Сб. научн. трудов / Редкол.: Ю.М. Мацевитый (отв. ред.) и др. – Харьков: Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – 2003. – Т. 2. – с. 505-511.

8. Теплопроводность твердых тел. Справочник / Под редакцией д.т.н, проф. А.С. Охотина. – М.: Энергоатомиздат. 1984 – 320 с.

9. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Госиздат Ф-М литературы, 1962. – 456 с.

10. Протокол № 38-4/309 от 25.05.3004 г. По результатам коррозионного обследования теплообменной трубки конденсатора турбины К-1000-60/1500-2 энергоблока № 1. ППР-2004.

© Шелепов И.Г., Сафронюк М.А., 2006