

*Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков, С.И. Хаев*

Уральский государственный технический университет – УПИ,  
г. Екатеринбург, Россия

## **ИСПАРЕНИЕ ВЛАГИ, СУШКА И УДАЛЕНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ С ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОК ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

### **АННОТАЦИЯ**

Представлены результаты экспериментального исследования процесса испарения влаги из слоя, сушки, растрескивания и последующего удаления влажных пористых отложений, имеющих слабую адгезию с металлической поверхностью. Описана экспериментальная установка и методика проведения исследования в трубках теплообменных аппаратов. Приведены параметры процесса сушки. Предложена методика обработки экспериментальных данных. Представлены результаты экспериментального стендового исследования влияния параметров процесса сушки отложений на эффективность термической очистки трубок теплообменных аппаратов.

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

При эксплуатации кожухотрубных теплообменных аппаратов (ТА), охлаждаемых водой природных естественных и искусственных водоёмов, наблюдается загрязнение трубок, приводящее к снижению тепловой эффективности этих аппаратов. При определенных условиях — невысоких (до 50°C) температурах теплоносителей и характерном химическом составе охлаждающей воды — образующиеся на внутренней поверхности трубок отложения имеют пористый (дисперсный) характер. Такой слой, в значительной мере состоящий из органических отложений и содержащий большое количество влаги, имеет слабую адгезию к металлической поверхности трубок. Это позволяет для удаления отложений из трубок (очистки теплообменных аппаратов) использовать термический метод.

Метод термической очистки трубок кожухотрубных теплообменных аппаратов (как правило, конденсаторов и сетевых подогревателей паровых турбин), заключающийся в высушивании слоя органических отложений внутри трубок и последующем удалении растрескавшихся и отслоившихся отложений потоком охлаждающей (нагреваемой) воды, применяется в настоящее время на многих тепловых электрических станциях (ТЭС). Широкое использование методов термической (вакуумной) очистки (сушки) трубок теплообменных аппаратов [1—3] определяется простотой технологии проведения очистки; причем снижение недогрева воды до температуры насыщения пара в результате очистки достигает 1,5...7,0 °C [2,3]. Исследование по изучению процесса испарения влаги из слоя, а также сушки дисперсных отложений в трубках ТА, вы-

полнено в целях разработки (уточнения) технологии очистки теплообменных аппаратов в условиях эксплуатации на ТЭС.

### **2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

В общем случае эффективность термических очисток определяется температурами сушильного агента и стенок трубок, скоростью и влажностью поступающего воздуха, химическим составом и количеством отложений на трубках, а также продолжительностью проведения очистки (сушки) [2].

При обследовании семнадцати ТЭС Урало-Сибирского энергетического региона было установлено, что продолжительность очистки (сушки) на различных ТЭС составляет от 6 до 14 часов, температура сушильного агента (воздуха) варьируется от 25 до 80°C, температура среды в межтрубном пространстве теплообменных аппаратов изменяется в диапазоне 70...80°C.

Эффективность термической очистки, оцениваемая по разности значений давления пара (температур воды) в ТА до и после его очистки, изменяется на различных ТЭС от 0,15 до 3 кПа при абсолютном значении давления пара в аппаратах 3...8 кПа. При этом разброс опытных данных по различным станциям весьма существенен. Это по мнению авторов определяется рядом факторов, в том числе:

- отсутствием систематизированных данных по влиянию различных параметров процесса на его эффективность;
- существенными различиями в химическом составе и толщине слоя отложений на трубках ТА в различных условиях эксплуатации; в данном случае очень важным фактором является наличие (или отсутствие) в слое загрязнений органических веществ, т.к. именно это определяет возможность растрескивания отложений в процессе сушки;
- отсутствием единой методики (технологии) термической очистки трубок; фактически на каждой ТЭС применяется оригинальная методика (параметры, режимы, продолжительность и т.п.).

Для проведения систематизированного исследования по уточнению и возможности обобщения данных о влиянии различных параметров процесса на эффективность очистки был разработан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

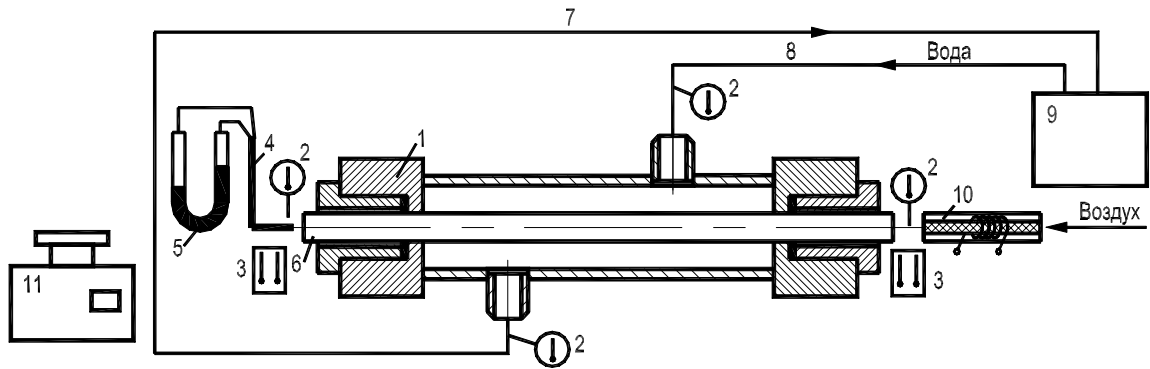


Рис.1. Схема экспериментальной установки. Обозначения см. в тексте

Основным исследуемым элементом стенда является рабочий модуль 1, в который устанавливались исследуемые образцы – рабочие трубки 6, длиной 300 мм. Температура воздуха, подаваемого в трубки, изменялась за счет нагрева в калорифере 10; температура стенки рабочих трубок (межтрубного пространства) задавалась и определялась температурой воды, циркулирующей в контуре, содержащем термостат 9 и трубопроводы 7,8. Влажность и температура воздуха на входе и выходе из рабочих трубок измерялась соответственно психрометрами 3 и термометрами 2. Скорость воздуха, подаваемого в рабочие трубки, замерялась с помощью трубки Пито-Прандтля 4. Измерения количества отложений в трубках (полное, удаленное сушкой и т.д., см. далее) проводились гравиметрическим методом (взвешиванием) с помощью аналитических весов 11.

Методикой экспериментального исследования с учетом данных обобщения результатов обследования ТЭС предусматривалось проведение опытов при следующих значениях основных параметров, определяющих эффективность термической очистки трубок теплообменных аппаратов:

- температуры сушильного агента (воздуха) – 25, 50 и 80 °С;
- скорости сушильного агента (воздуха) – 3...5 м/с;
- температуры стенок рабочих трубок (межтрубного пространства) – 50, 80 °С;
- продолжительности сушки – 3, 6, 9, 12 ч.

В процессе опытов на каждом этапе (перед установкой влажной загрязненной трубки в рабочий модуль, после окончания сушки, после промывки трубки высокоскоростным потоком воды, последующей сушки в атмосферных условиях, полной очистки оставшихся отложений механическим способом и т.д.) проводилось взвешивание образцов (рабочих трубок) на аналитических весах.

Проведенная оценка показала, что относительные среднеквадратичные погрешности измерения параметров составляли:

- для скорости воздуха – 1,7 %;
- температуры теплоносителей – 1 %;
- массы отложений – 13 %.

Для проведения исследований было вырезано более 100 образцов трубок из различных зон теплообменных аппаратов (конденсаторов турбин), работающих на ТЭС. При вырезке образцов использовался специальный инструмент, позволяющий извлекать трубку из конденсатора без разрушения имеющихся отложений.

Ретроспективный анализ химического состава циркуляционной воды на ТЭС, откуда были доставлены исследуемые трубки, показал: высокий уровень окисляемости (от 8 до 30 мг/л), высокий БПК (биологическая потребность в кислороде) от 1 до 3,5 мг/л при значении рН от 7 до 8 и низкой жесткости (от 1 до 3 мг-экв/л). Анализ состава отложений показал высокое содержание органических веществ (потери при прокаливании составляли до 38% от общего количества отложений).

В качестве критерия, характеризующего эффективность термической очистки трубок теплообменных аппаратов, был предложен параметр, определяющий относительное количество удаленных отложений:

$$\bar{M} = \frac{M_y}{M_0}, \text{ где } M_y, M_0 \text{ — количество удаленных в}$$

результате термической сушки и последующей промывки потоком воды отложений, общее количество отложений в трубке соответственно.

Для обработки и анализа полученных экспериментальных данных разработана методика, основанная на анализе физических процессов, происходящих при испарении влаги из слоя и сушке пористых влажных материалов, образующих внутри трубок теплообменных аппаратов дисперсные отложения.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [4], скорость сушки материала в зависимости от времени можно представить в виде графика, показанного на рис. 2.

Здесь скорость сушки определяется изменением влагосодержания в единицу времени ( $U = [\text{кг влаги/кг материала}]$ ). В зоне I происходит подогрев материала, в зоне II – удаление свободной

влаги, а в зоне III – из материала удаляется связанная гигроскопическая влага.

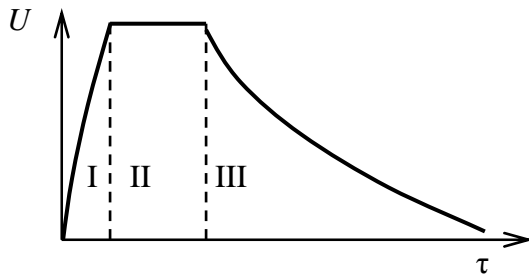


Рис. 2. Кривая скорости сушки материала в зависимости от времени сушки

Учитывая малую толщину слоя отложений (~ 0,1...0,3 мм), первый этап оказывается непродолжительным и основное время сушки отложений занимают этапы удаления свободной и связанной влаги.

В период II (см. рис. 2) скорость сушки постоянна, а температура на поверхности слоя равна температуре мокрого термометра, определяемой по температуре и влажности сушильного агента. В этот период в слое возникают максимальные по толщине градиенты влажности  $\partial U/\partial x$  (здесь  $x$  – координата по нормали к поверхности стенки), что приводит к появлению максимальных сдвиговых усилий, обуславливающих разрушение слоя отложений.

В период постоянной скорости сушки интенсивность испарения жидкости ( $[кг/м^2] \cdot с$ ) с поверхности слоя можно приближенно оценить по зависимости [4]

$$I = \frac{\beta_c}{R_{п}} (P_{п} - P_c), \quad (1)$$

здесь  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентраций диффундирующей жидкости, м/с;

$R_{п}$  – универсальная газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг·К);

$P_{п}$ ,  $P_c$  – давление водяных паров над поверхностью материала и в потоке сушильного агента, Па.

Коэффициент массоотдачи ( $\beta_c$ ) оценивался исходя из гипотезы об аналогии между процессами тепло- и массообмена; при этом принималось, что коэффициент температуропроводности ( $a$ ) равен коэффициенту концентрационной диффузии ( $D_c$ ):

$a = D_c = D_0 \cdot (T/T_0)^{1,8} \cdot P_0/P$  [4], где индекс «0» определяет параметр при температуре  $T_0 = 273,15$  К ( $t_0 = 0$  °С) и давлении  $P_0 = 100$  кПа.

Диффузионное число Нуссельта, определяемое по формуле  $Nu_m = \beta_c/(d_{вн} \cdot D_c)$ , где  $d_{вн}$  – внутренний диаметр трубки, соответствовало тепловому числу Нуссельта.

Расчеты, проведенные исходя из сделанных допущений, показали, что интенсивность испарения жидкости с поверхности слоя более чем на порядок превышает экспериментальные данные по интенсивности массопереноса в слое. Это позволило в

дальнейшем анализе для определения градиентов влажности в материале пренебречь скоростью (интенсивностью) испарения влаги с поверхности слоя.

Интенсивность массопереноса в слое, а следовательно, и величина сдвиговых усилий в слое при его сушке в соответствии с [4,5] определяются градиентами влагосодержания и температур ( $\partial U/\partial x$ ,  $(\partial t/\partial x)_{вл}$ ). Величины усилий, возникающих в слое и приводящих к его разрушению, зависят также от соотношения температур воздуха (сушильного агента) и поверхности уже высушенного слоя отложений  $(\partial t/\partial x)_c$ . Последнее определяется тем, что продолжительность процесса сушки может превышать время, необходимое для полного высыхания отложений.

На основании методов теории подобия и результатов исследования сушки различных пористых материалов [4,5] для обработки экспериментальных данных был предложен параметрический комплекс

$$K = A \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right) + B \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{вл} + C \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right)_c, \quad (2)$$

где  $\partial U/\partial x$  – градиент влажности в слое;  $(\partial t/\partial x)_{вл}$ ,  $(\partial t/\partial x)_c$  – градиенты температур во влажных и сухих отложениях соответственно;  $A, B, C$  – коэффициенты.

На рис. 3 в качестве примера представлены результаты обработки экспериментальных данных по трубкам, извлеченным из ТА (конденсаторов турбин) ряда ТЭС, в зависимости от параметров процесса термической очистки.

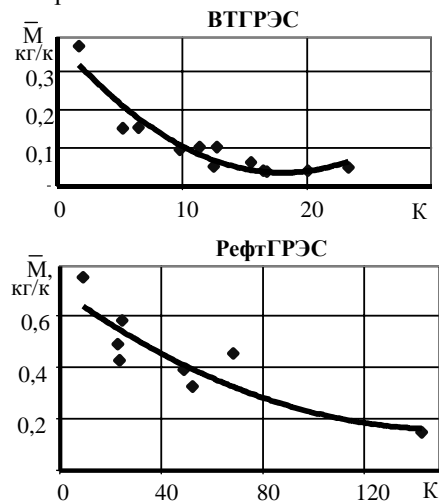


Рис. 3. Эффективность термической очистки трубок конденсаторов различных ТЭС:

ВТГРЭС – Верхнетагильская ГРЭС, РефтГРЭС – Рефтинская ГРЭС

Коэффициенты  $A, B, C$  в формуле (2) подбирались таким образом, чтобы для каждой ТЭС получить максимальный коэффициент корреляции между массивами экспериментальных данных и аппроксимирующими кривыми.

Для учета продолжительности очистки коэффициенты  $A, B$  и  $C$  в комплексе  $K$  были представлены в виде полиномов в зависимости от времени сушки. Полученные данные показывают, что эффективность термической очистки  $\bar{M}$  в зависимо-

сти от параметров процесса и состава отложений в конкретных условиях эксплуатации изменяется от 0,05 до 0,7 (удаляется до 70 % отложений).

На каждой ТЭС характер этих зависимостей различный, что определяется прежде всего конкретным составом отложений в трубках конденсаторов.

В результате обобщения всего комплекса исследований авторами была разработана и рекомендована технология термической очистки трубок теплообменных аппаратов от дисперсных отложений в условиях конкретных ТЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплообменники** энергетических установок: учебник для вузов / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др. под ред. Ю.М. Бродова. Екатеринбург: Изд-во СОКРАТ, 2003. 968 с.
2. **Руководящие** указания по предотвращению образования минеральных органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1975. 40 с.
3. **Анализ** эффективности и возможности применения термических методов сушки конденсаторов ПТУ / К.Э. Аронсон, С.И. Хаев, А.Ю. Рябчиков, Г.Д. Бухман // Совершенствование теплотехнического оборудования ТЭС, внедрение систем сервисного обслуживания и ремонта: материалы III Международной научно-практической конференции 13-15 марта 2001. Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2002. С. 258—568.
4. **Лебедев П.Д.** Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М.: Энергия, 1972. 320 с.
5. **Лыков А.В.** Теплообмен: справочник. М.: Энергия, 1973. 560 с.