

Er.6.7

VANETUS

TALLINNA POLÜTEHNILISE  
INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 209

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И  
ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНО-  
ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ**

Сборник статей под  
общей редакцией И. П. ЭПИКА

ТАЛЛИН 1963



Ер.6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED  
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

СЕРИЯ А

№ 209

1963

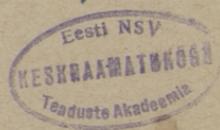
УДК 621.182.001.5

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ

Сборник статей под общей редакцией  
И. П. ЭПИКА

ТАЛЛИН 1963

Ep. 5475



УДК 536.24.083

*И. П. Эпик, А. А. Отс, В. И. Резник*

## О МЕТОДИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ С ПОМОЩЬЮ $\alpha$ -КАЛОРИМЕТРОВ

Эффективность поверхностей нагрева котельных агрегатов в значительной мере определяется характером и свойствами отложений, т. е. степенью загрязнения. Последняя может быть определена путем сравнения тепловосприятия незагрязненных и загрязненных поверхностей нагрева, работающих в идентичных условиях (скорости и температуры газов, температуры стенки, концентрация пыли и т. д.). Решение этой задачи связано с целым рядом трудностей, которые особенно возрастают при нестационарных условиях теплообмена, когда степень загрязнения поверхности нагрева зависит от времени, например, как это имеет место в котлах при сжигании эстонских сланцев. Таким образом требуется в каждый момент времени в широком диапазоне изменения параметров, определяющих тепловую эффективность загрязненных поверхностей, определить тепловосприятие незагрязненной поверхности нагрева.

В настоящей статье рассматривается предложенная авторами методика исследования степени загрязненности поверхностей нагрева котельных агрегатов, позволяющая в любой момент времени сравнить тепловосприятие загрязненной поверхности нагрева с ее тепловосприятием в незагрязненном состоянии.

Степень загрязненности поверхностей нагрева котельных агрегатов может быть охарактеризована несколькими способами. В нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов [1] степень загрязненности выражается через коэффициент загрязнения  $\varepsilon = \delta/\lambda$ , где  $\delta$  — приведенная толщина отложений и  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности отложений. Наряду с коэффициентом  $\varepsilon$  степень загрязнения можно охарактеризовать с помощью коэффициента использования по-

верхности нагрева  $\psi$ , представляющего собой отношение коэффициентов теплопередачи  $\kappa$  и  $\kappa^{\circ}$  загрязненной и незагрязненной поверхности нагрева.

Коэффициент теплопередачи от газов к внутренней среде определяется известным выражением:

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon_{\text{ст}} + \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент теплоотдачи от газов к поверхности;  
 $\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от поверхности к внутренней среде;

$\varepsilon_{\text{ст}}$  — тепловое сопротивление стенки.

Для незагрязненной поверхности нагрева, когда  $\varepsilon = 0$ :

$$\kappa^{\circ} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{\circ}} + \varepsilon_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_2^{\circ}}}. \quad (2)$$

С другой стороны, коэффициент теплопередачи может быть определен непосредственно из уравнения теплового баланса:

$$\kappa = \frac{q}{\Delta t}. \quad (3)$$

где  $q$  — тепловосприятие единицы поверхности нагрева;  
 $\Delta t$  — температурный напор.

При предположении о равенстве коэффициентов теплоотдачи незагрязненных и загрязненных поверхностей нагрева ( $\alpha_1^{\circ} = \alpha_1$  и  $\alpha_2^{\circ} = \alpha_2$ ) получим:

$$\varepsilon = \frac{1}{\kappa} - \frac{1}{\kappa^{\circ}} \quad (4)$$

$$\text{и } \psi = \frac{\kappa}{\kappa^{\circ}} \quad (5)$$

или при  $\Delta t^{\circ} = \Delta t$ ,  $\psi = \frac{q}{q^{\circ}}$

Коэффициент теплопередачи  $\kappa^{\circ}$  в формулах (4) и (5) не может быть определен из теплового баланса при испытании загрязненной поверхности нагрева. Ввиду этого было предложено определить  $\kappa^{\circ}$  при помощи зависимости  $\kappa^{\circ}$  от коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  некоторой вспомогательной теплообменной поверхности, тепловосприятие которой не зависело бы от состояния загрязненности исследуемой поверхности. В качестве такой вспомогательной поверхности удобно применить цилиндрический калориметр нестационарного теплового режима, т. н.  $\alpha$ -калориметр [2]. Преимущества  $\alpha$ -калориметра, как вспомогательной теплообменной поверхности, следующие:

1)  $\alpha$ -калориметр нагревается до необходимой температуры в течение очень короткого времени и поэтому практически не успевает загрязняться;

2)  $\alpha$ -калориметр работает на основе принципа теплоемкости и поэтому тот небольшой слой отложений, который образуется в течение короткого периода времени, практически не влияет на показания калориметра.

Разработанная авторами конструкция  $\alpha$ -калориметра приведена на фиг. 1. В стальной цилиндр диаметром 37,9 мм и длиной 180 мм зачеканена 0,5 мм ХК термопара для регистрации подъема температуры в центре цилиндра. Для изоляции измерительного участка калориметра от торцевых тепловых потоков, концы цилиндра были защищены экранами. Поскольку запроектированный  $\alpha$ -калориметр предназначен для исследования в высокотемпературной области газов, он был снабжен воздухоохлаждаемым стержнем.

В низкотемпературной области газов, где теплоотдача излучением на много меньше, чем теплоотдача конвекцией (III граничное условие), коэффициент теплоотдачи определяется после наступления регулярного теплового режима формулой [3]:

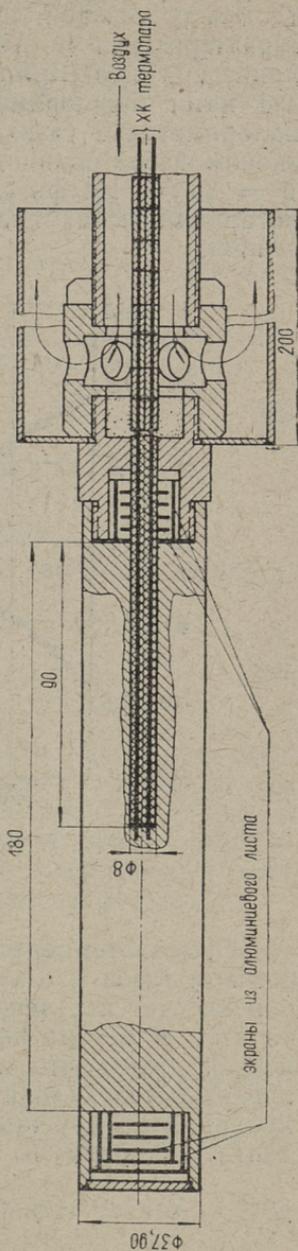
$$\alpha = \frac{\ln \Delta\theta_{II} - \ln \Delta\theta_I}{\tau_{II} - \tau_I} \cdot \frac{\Phi}{\%} \quad (6)$$

где  $\Delta\theta_I = \vartheta - t_I$  — разность температур между газовой средой и любой точкой калориметра в момент времени  $\tau_I$ ;

$\Delta\theta_{II} = \vartheta - t_{II}$  — то же, в момент времени  $\tau_{II}$ ;

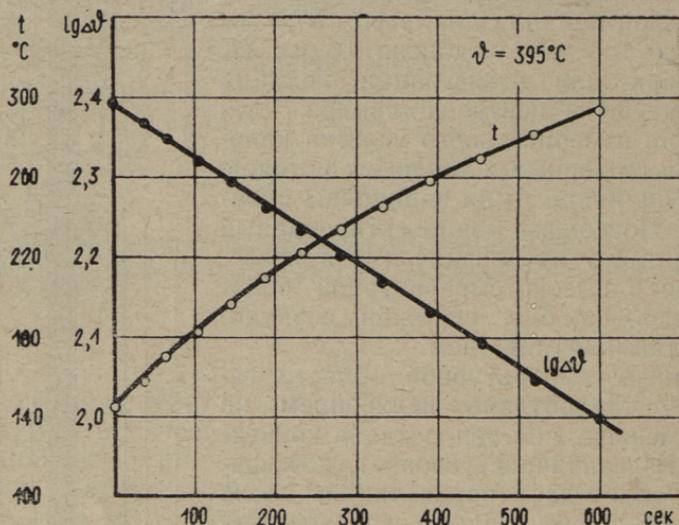
$\Phi$  — константа калориметра;

% — критерий регулярного теплового режима.



Фиг. 1. Калориметр нестационарного теплового режима. Диаметр цилиндра 37,9 мм

Из формулы (6) видно, что при конвективном теплообмене между газовой средой и  $\alpha$ -калориметром температурная характеристика  $\ln \Delta\theta = \theta(\tau)$  является линейной. На фиг. 2 приведена низкотемпературная характеристика изготовленной нами  $\alpha$ -калориметра. Характеристика снята введением калориметра в газодход перед последним пакетом водяного экономайзера сланцевого котла ТП-17 при температуре газов  $\theta = 395^\circ\text{C}$ . Из фигуры видно, что опытные точки в полупологарифмических координатах хорошо ложатся на прямую линию.



Фиг. 2. Низкотемпературная характеристика калориметра

В высокотемпературной области газов теплообмен между потоком газов и  $\alpha$ -калориметром происходит главным образом за счет излучения (II граничное условие). Основываясь на этом и рассматривая  $\alpha$ -калориметр как цилиндр бесконечной длины, что обеспечивается экранированием торцевых поверхностей калориметра, можно температуру любой точки калориметра при приеме постоянного потока тепла  $[q]$  рассчитать из формулы [4]:

$$t(r; \tau) = t_0 + \frac{[q]}{\lambda} R \left[ 2 Fo - \frac{1}{4} \left( 1 - 2 \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2 I_0(\mu_n)} I_0 \left( \mu_n \frac{r}{R} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo) \right], \quad (7)$$

где  $t_0$  — начальная температура калориметра;  
 $R$  — радиус калориметра;  
 $r$  — расстояние от оси калориметра до данной точки;  
 $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала калориметра;

$Fo = a\tau/R^2$  — критерий Фурье;

$\tau$  — время;

$a$  — коэффициент температуропроводности материала калориметра;

$I_0$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

$\mu_n$  — корни уравнения  $I_1(\mu_n) = 0$ .

Тепловой поток  $[q]$ , воспринимаемый  $\alpha$ -калориметром, увеличивает его теплосодержание. В соответствии с этим:

$$q = c\gamma \frac{R}{2} \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (8)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость материала калориметра;

$\gamma$  — удельный вес материала калориметра;

$\bar{t}$  — средняя температура калориметра.

Средняя температура  $\alpha$ -калориметра является функцией времени и определяется формулой:

$$\bar{t} = \frac{1}{R} \int_0^R t(r; \tau) dr = t(\tau). \quad (9)$$

Анализ выражения (7) показывает, что начиная от значения критерия Фурье  $Fo \geq 0,5$  зависимость температуры любой точки калориметра от времени является практически линейной. Основываясь на этом, можно рассчитать температуры  $t_1$  и  $t_2$  соответственно на наружной поверхности ( $r=R$ ) и на оси  $\alpha$ -калориметра ( $r=0$ ) из следующих формул:

$$t_1 = t_0 + \frac{[q]}{\lambda} R \left( 2Fo + \frac{1}{4} \right), \quad (10)$$

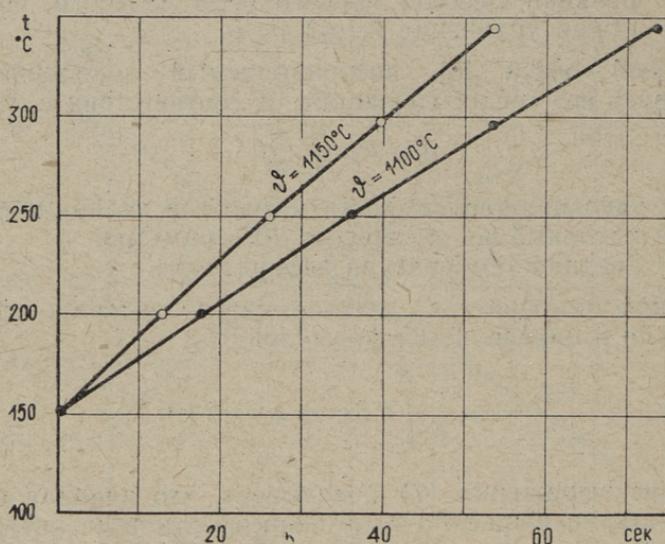
$$t_2 = t_0 + \frac{[q]}{\lambda} R \left( 2Fo - \frac{1}{4} \right). \quad (11)$$

Очевидно, начиная от  $Fo \geq 0,5$  дифференциалы температуры и времени в формуле (8) можно заменить конечными разностями и формула для расчета тепловосприятия  $\alpha$ -калориметра принимает вид:

$$[q] = c\gamma \frac{R}{2} \frac{\Delta t}{\Delta \tau}. \quad (12)$$

Применение формулы (12) для определения тепловосприятий калориметра ограничивается условием  $Fo \geq 0,5$ . Поэтому каждому калориметру, в зависимости от его физической и

геометрической характеристик, соответствует свое время ожидания, по истечении которого температурная характеристика становится линейной. Для калориметра, приведенного на фиг. 1, изготовленного из стали 3, соответствует время ожидания  $\tau' \approx 15$  сек, т. е. приблизительно через 15 секунд после введения  $\alpha$ -калориметра в высокотемпературную среду его температурная характеристика становится линейной и для расчета воспринимаемого теплового потока можно использовать формулу (12).



Фиг. 3. Высокотемпературная характеристика калориметра

Высокотемпературная характеристика  $\alpha$ -калориметра, полученная при вводе прибора в газоход котла ТП-17 между фестоном и пароперегревателем, приведено на фиг. 3. Из фигуры видно, что с течением времени наблюдается некоторое отклонение зависимости от прямой линии. Это вызвано тем, что с течением времени температура наружной поверхности  $\alpha$ -калориметра повышается и тем самым увеличивается его собственное (обратное) излучение. Поэтому применение конечных разностей температур и времени для расчета тепловосприятия калориметра является в некоторой степени приближенным. Для увеличения точности измерения необходимо интервал подъема температур в центре калориметра выбрать возможно минимальным. Однако нужно считаться и с тем, что с уменьшением этого интервала уменьшается точность измерения  $\Delta t$ . Как показывает опыт авторов, оптимальный

подъем температур при температуре газов  $\vartheta = 950 - 1200^\circ\text{C}$  находится в пределах  $\Delta t = 30 - 50^\circ\text{C}$ .

Поскольку тепловосприятие  $\alpha$ -калориметра зависит от температуры его наружной поверхности, то для сравнимости следует привести значения измеренных величин тепловосприятий к единым условиям, например к условию, что температура наружной поверхности прибора равнялась бы  $0^\circ\text{K}$ . Для этого используем коэффициент собственного излучения в виде:

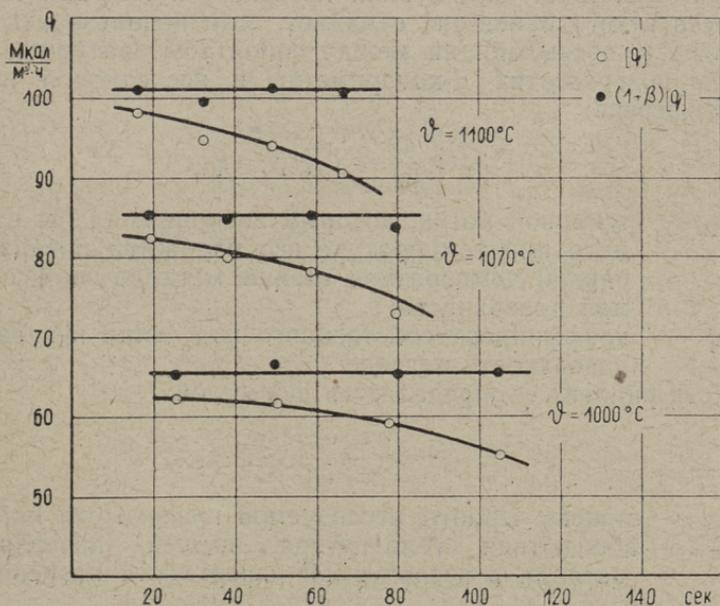
$$\beta = \frac{q_{\text{соб}}}{[q]} = \frac{\varepsilon_\alpha \sigma_0 T_1^4}{[q]} \quad (13)$$

где  $q_{\text{соб}}$  — интенсивность собственного излучения калориметра;

$\varepsilon_\alpha$  — степень черноты калориметра;

$\sigma_0$  — коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Используя коэффициентом  $\beta$ , тепловосприятие  $\alpha$ -калориметра при  $T_1 = 0^\circ\text{K}$  выражается как  $(1 + \beta)[q]$ , где  $[q]$  — тепловосприятие калориметра при данной температуре наружной поверхности. За счет увеличения температуры калориметра тепловосприятие  $[q]$  со временем уменьшается, а приведенное тепловосприятие  $(1 + \beta)[q]$  от времени не зависит. Для иллюстрации высказанного на фиг. 4 приведены за-



Фиг. 4. Зависимости истинной и приведенной тепловосприятий калориметра от времени

висимости величин  $[q]$  и  $(1 + \beta) [q]$  от времени при различных температурах газов. Измерения проведены в газоходе котла ТП-17.

При  $Fo \geq 0,5$  ( $\tau \geq \tau'$ ) температура на наружной поверхности  $\alpha$ -калориметра и в его центре отличаются друг от друга на постоянную величину  $\Delta T = T_1 - T_2 = \text{const}$ . Из формул (10) и (11) получается:

$$\Delta T = \frac{[q] R}{2 \lambda}, \quad (14)$$

и расчетная формула коэффициента собственного излучения калориметра принимает вид:

$$\beta = \frac{\varepsilon_{\alpha} \sigma_0 [T_2 + \frac{1}{4} \frac{d}{\lambda} [q]]^4}{[q]} \quad (15)$$

При исследовании высокотемпературных поверхностей нагрева необходимо, чтобы температура наружной поверхности  $\alpha$ -калориметра равнялась бы температуре на наружной поверхности исследуемой поверхности нагрева. Поскольку температура наружной поверхности калориметра зависит от его тепловосприятия, то при проведении исследований трудно получить равные температуры на наружной поверхности  $\alpha$ -калориметра и на исследуемой поверхности нагрева. Необходимость такого равенства отпадает, если использовать коэффициент  $\kappa$ , связывающий между собой температурные условия на поверхностях  $\alpha$ -калориметра и исследуемой поверхности нагрева:

$$\kappa = \frac{q_{\alpha}}{[q]} = 1 + \beta - \varphi, \quad (16)$$

где  $q_{\alpha}$  — тепловой поток, который воспринимал бы калориметр при температуре его наружной поверхности, равной температуре стенки металла в исследуемой поверхности;

$\varphi$  — коэффициент собственного излучения исследуемой поверхности нагрева.

Коэффициент  $\varphi$  определяется формулой:

$$\varphi = \frac{\varepsilon_n \sigma_0 T_{\text{ст}}^4}{[q]}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_n$  — степень черноты исследуемой поверхности нагрева;  
 $T_{\text{ст}}$  — абсолютная температура внешней поверхности металла в исследуемой поверхности нагрева.

Очевидно, что при  $\kappa = 1$  воспринимаемый  $\alpha$ -калориметром тепловой поток равен тепловому потоку воспринимаемой

одиночной трубы, если бы температура ее наружной поверхности была бы равна температуре стенки в исследуемой поверхности.

Коэффициент теплоотдачи от газов к  $\alpha$ -калориметру на основании проведенного анализа выражается формулой:

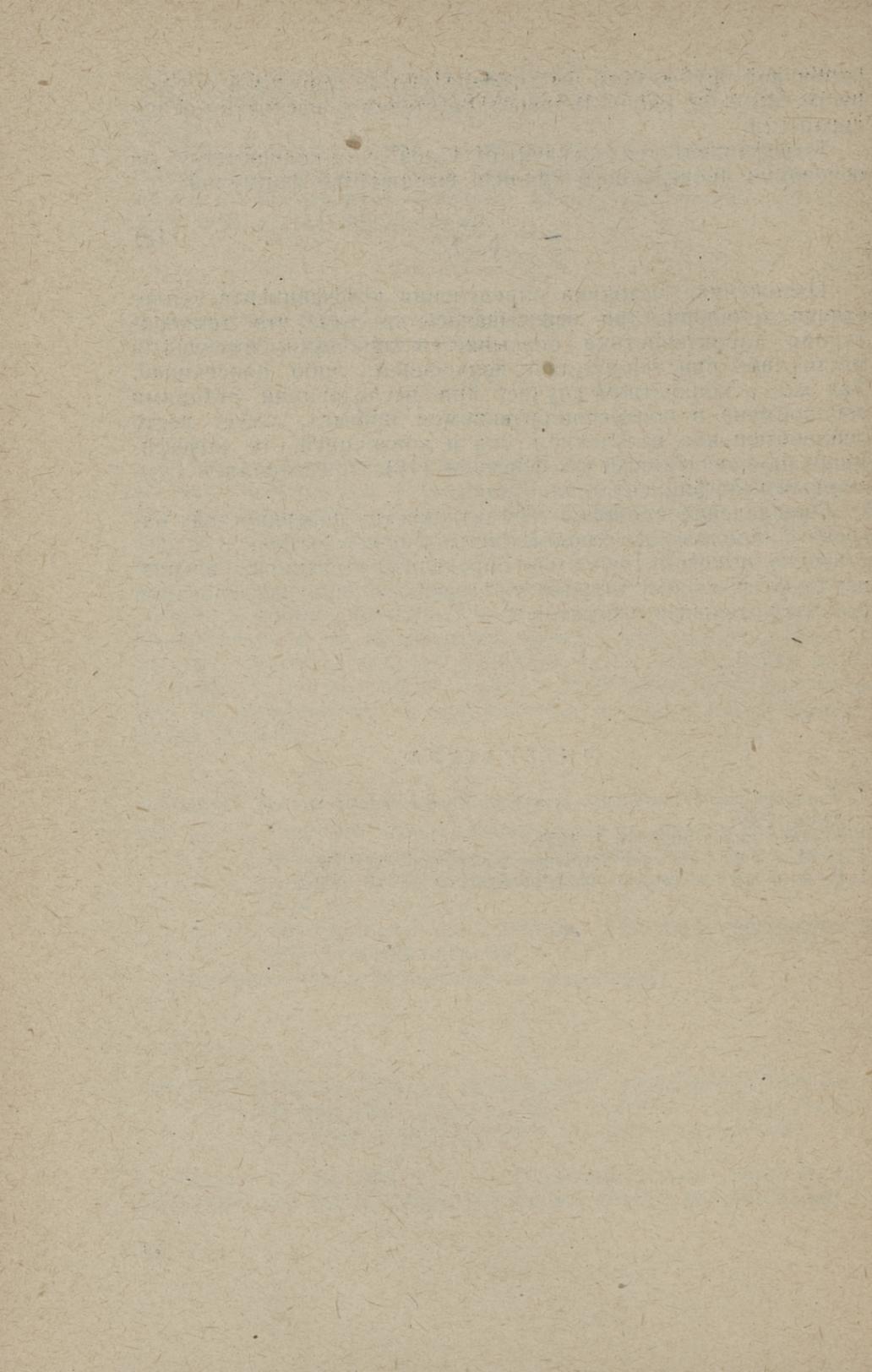
$$\alpha = \frac{Q_{\alpha}}{\vartheta - t_{ст}} \quad (18)$$

Изложенная методика определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ -калориметра основывалась на том, что температурная характеристика описывается законами, имеющими место либо при теплоотдаче излучением, либо конвекцией. Так как в конкретном случае, при исследовании авторами теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах, имеет место теплообмен как излучением, так и конвекцией, то коэффициент  $\alpha$ , рассчитанный по формуле (18), представляет суммарный коэффициент теплоотдачи.

Определение тепловой эффективности поверхностей нагрева с помощью  $\alpha$ -калориметров позволяет быстро и с достаточно высокой точностью определить степень их загрязненности и может широко пользоваться при исследовании работы котельных агрегатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.
2. «Точная индустрия», № 1, 1935.
3. Г. М. Кондратьев. Тепловые измерения. М., 1957.
4. В. А. Лыков. Теория теплопроводности. М—Л., 1952.



УДК 621.182.001.5

А. А. Отс, В. И. Резник

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАРОВОЙ ОБДУВКИ

С повышением параметров пара и единичной мощности котельных агрегатов увеличивается поверхность нагрева пароперегревателя и становится необходимым располагать значительную его часть в зоне более высоких температур газа. Все это предопределяет необходимость широкого использования ширмовых поверхностей нагрева. При сжигании ряда топлив, по условиям загрязнения, ширмовые поверхности используются и в зоне низких температур газов.

В котлах высокого давления для сжигания сланцев типа ТП-17 (паропроизводительностью 220 т/ч с параметрами пара 100 ата и 540°C) весь пароперегреватель выполнен из ширм, при этом в основном продольно-обтекаемых. С повышением параметров пара и мощности котлов для сжигания сланцев ширмое применение находят поперечно-обтекаемые ширмовые поверхности нагрева. Если в котле ТП-17 поперечно-обтекаемая поверхность пароперегревателя составляет около 25% от суммарной, то в котле ТП-67 (производительность 320 т/ч с параметрами пара 140 ата и 570/570°C) для поперечно-обтекаемых поверхностей увеличивается до 50%. При этом для снижения загрязнения таких ширм приходится ограничивать скорости газов. Применение для мощных котлов поперечно-обтекаемых ширмовых поверхностей со скоростями газов до 3,5 — 4 м/сек неизбежно приводит к резкому увеличению габаритов котла.

Условия теплообмена в конвективных поверхностях нагрева сланцевых котлов имеют ряд существенных особенностей, что вызвано специфическими свойствами минеральной части топлива. В зависимости от различных факторов (главным образом от температуры металла и скорости газов) на поперечно-обтекаемых поверхностях нагрева могут образовываться рыхлые или плотные отложения [1]. Тепловой расчет поперечно-обтекаемых ширмовых поверхностей нагрева при

сжигании эстонских сланцев в настоящее время производится по нормативному методу расчета котельных агрегатов [2] без каких-либо факторов, учитывающих специфические свойства топлива, и характеризуется следующими основными положениями:

загрязнения поверхности учитываются коэффициентом загрязнения  $\epsilon$ , численное значение которого определяется исходя из предположения, что отложения являются сыпучими;

коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется как для обычных коридорных пучков труб;

расчетная поверхность нагрева ширм определяется по периметру труб;

изменения тепловой эффективности за счет применения очистки не учитываются.

Как показывает ряд исследований [1, 3, 4 и др.], положения нормативного метода в части расчета ширмовых поверхностей нагрева при сжигании эстонских сланцев нуждаются в серьезном дополнении и корректировке. Необходимо также учитывать нестационарность теплообмена в поверхностях нагрева сланцевых котлов [4] и условия очистки поверхности (паровая обдувка, виброочистка и т. д.).

В настоящей статье приводятся данные о тепловой эффективности поперечно-обтекаемых ширм при сжигании эстонских сланцев в диапазоне скорости газов 5,2—7,2 м/сек и температурах пара 400—510°C при применении паровой обдувки.

### Опытные ширмы

Опытные поперечно-обтекаемые ширмы были смонтированы в переходном газоходе котла ТП-17 на Прибалтийской ГРЭС. Опытная установка состоит из трех последовательно включенных по пару ширм с поверхностью нагрева (по периметру труб) 5,52 м<sup>2</sup> каждая. Общий вид опытных ширм приведен на фиг. 1. Последовательное включение ширм позволяет получить максимальную температуру стенки при минимальной поверхности нагрева. Каждая ширма выполнена из пяти параллельно включенных труб диаметром 38×6 мм из стали 12 ХМФ. Шаг между отдельными трубами 40 мм, а между ширмами 585 мм. Очистка ширм производилась обдувочным прибором ОПК-3. Для защиты крайних труб от изнашивающего действия обдувочного прибора они были закрыты накладками длиной 1 м.

Насыщенный пар из барабана котла по одной паропроводящей трубе, пройдя регулирующий вентиль (позволяющий регулировать расход пара через ширмы, а следовательно и

его температуру), поступает во входную ширму (ширма № 1), затем в среднюю (№ 2) и выходную ширму (№ 3). Из выходной ширмы пар поступает в промежуточный коллектор основного пароперегревателя котла. Таким образом поток пара через опытные ширмы движется параллельно потоку пара в основном пароперегревателе и расход определяется, кроме степени открытия вентиля, перепадом давления между барабаном и промежуточным коллектором, т. е. нагрузкой котла. Для проведения измерений по газовой стороне на боковой стене переходного газохода в районе опытных ширм установлены лючки.

Схема измерений была принята такой, чтобы обеспечить возможность определения тепловосприятости второй и третьей ширмы. Первая ширма не исследовалась, поскольку в нее поступает насыщенный пар, который в соединительном трубопроводе может увлажняться.

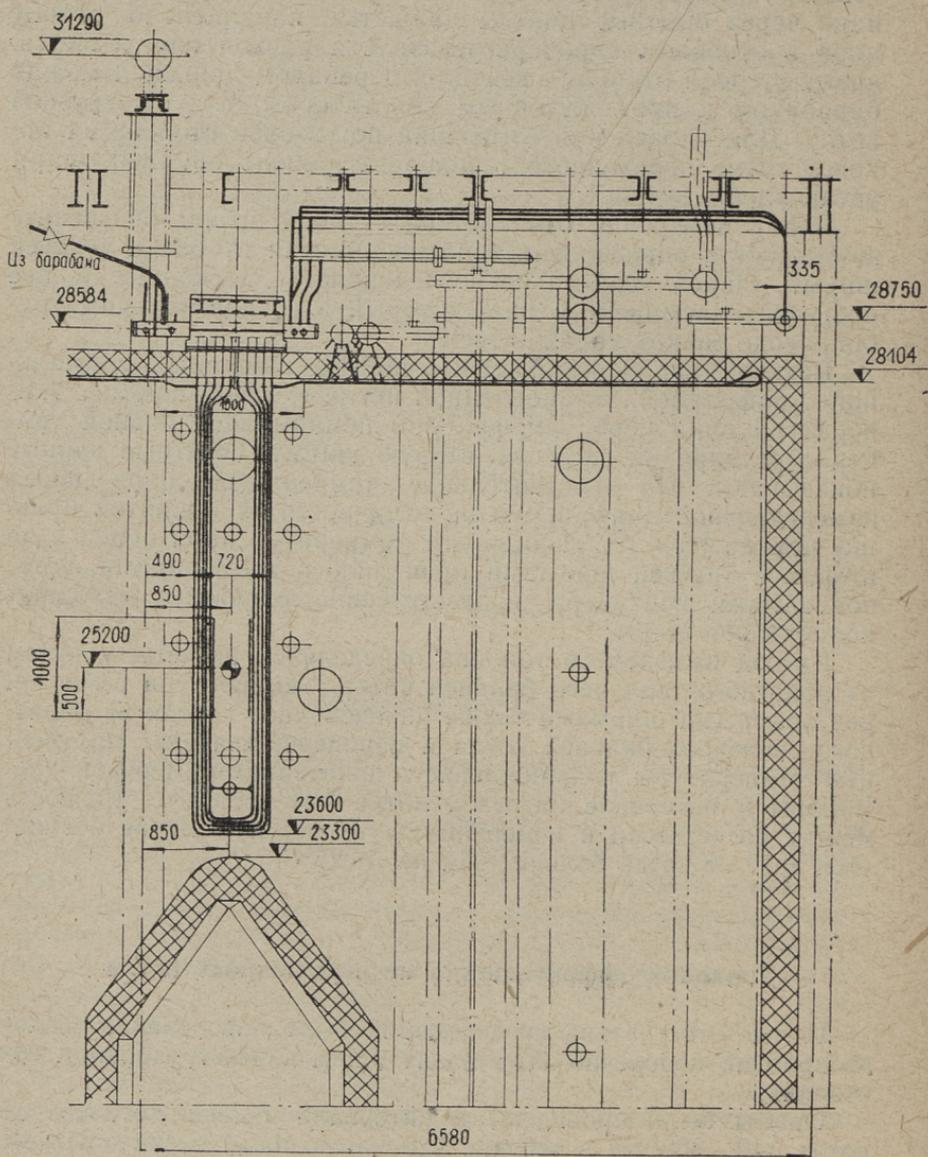
Расход пара через опытные ширмы измерялся нормальной диафрагмой, установленной после входной ширмы. Температура пара перед диафрагмой принималась равной температуре пара на входе во вторую ширму. Опытные данные показывают, что действительная температура пара перед измерительной диафрагмой не отличается от принятой больше, чем на  $0,5-1^{\circ}\text{C}$ . Измерение температур пара перед и за второй и третьей ширмами проводилось термомпарами, установленными в штуцерах соответственно входных и выходных коллекторов ширм.

Расход сжигаемого топлива определялся расчетным путем из обратного теплового баланса котла. Температура газов перед опытными ширмами также определялась исходя из обратного теплового баланса котла и пароперегревателя. Полученные температуры сравнивались с показаниями отсосной термомпары в интервале нагрузок котла  $126-185$  т/ч. Разность между расчетными и измеренными температурами не отличается друг от друга больше, чем на  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ .

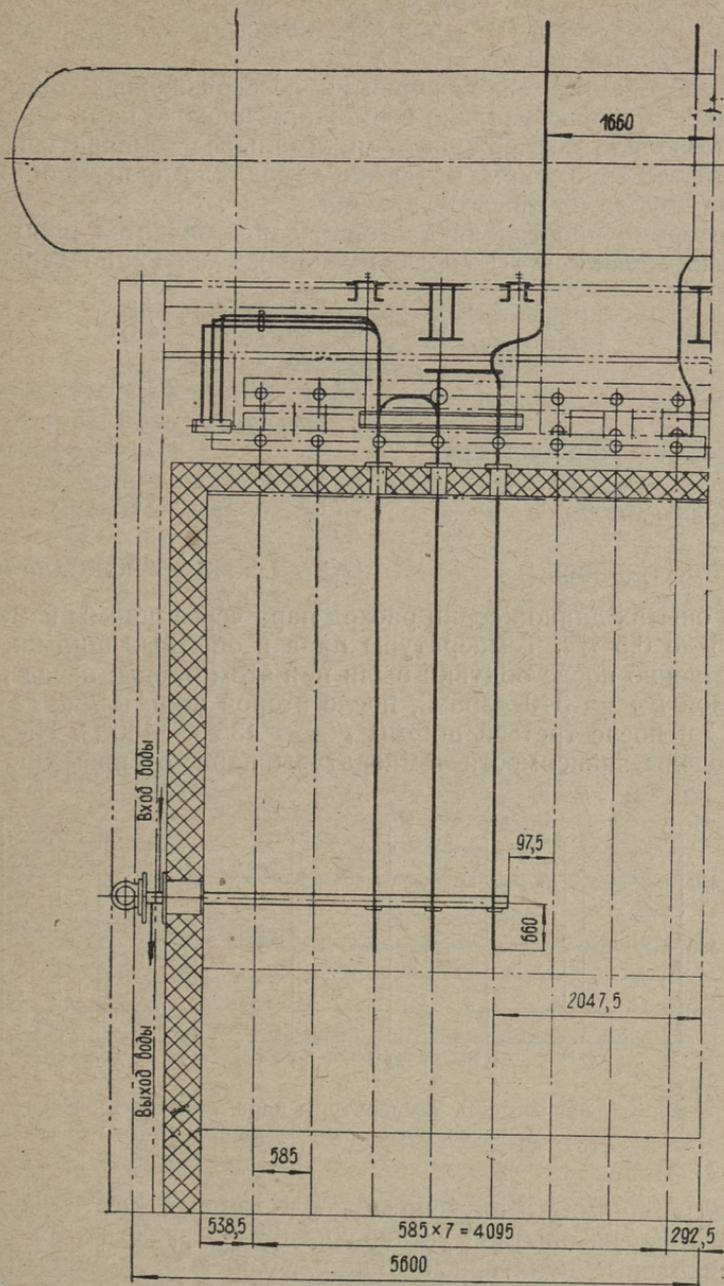
### Тепловая эффективность незагрязненных ширм

Целью этого этапа исследований было определение тепловосприятости поперечно-обтекаемых ширм в незагрязненном состоянии.

Опыты были проведены в интервале производительности котла  $140-200$  т/ч в течение 220 часов после пуска опытных ширм. Чистота ширм обеспечивалась интенсивной обдувкой прибором ОПК-8. Изменение нагрузки котла дало возможность менять температуру и скорости газов в районе попереч-



Фиг. 1. Общий вид



опытных ширм

2 Исследование теплообмена

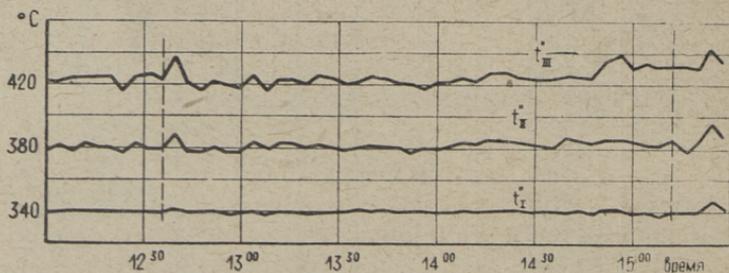
но-обтекаемых ширм. При изменении нагрузки котла в указанных пределах скорость газов изменилась от 3,5 до 5,8 м/сек, а температура от 940 до 1160°C.

Исследования тепловосприятия незагрязненных ширм проводились при максимально возможном расходе пара через них. Это позволило поддерживать минимальные температуры стенки металла труб ширм, что резко замедляло процесс образования на трубах плотных отложений.

Во время проведения настоящих опытов котел работал на эстонских сланцах III сорта, имеющих следующие характеристики:

влажность	$W^p = 12,0 - 14,0\%$ ;
зольность	$A^p = 40,0 - 42,0\%$ ;
содержание карбонатной	
двуокиси углерода	$CO_2^p = 14,5 - 15,0\%$ ;
теплота сгорания	$Q_{н}^p = 2550 - 2600$ ккал/кг

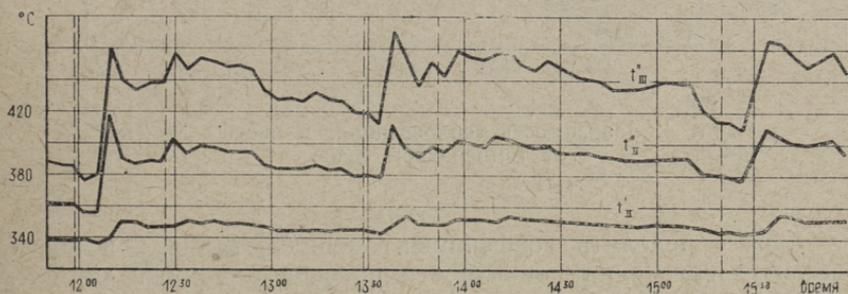
В опытах данной серии расход пара через ширмы изменялся от 4,5 до 6,5 т/ч. Температуры пара в опытных ширмах непосредственно после обдувки были при этом равны: перед второй ширмой  $t'_{II} = 340 - 355^\circ\text{C}$ , после второй ширмы  $t''_{II} = 385 - 400^\circ\text{C}$  и после третьей ширмы  $t'''_{III} = 435 - 460^\circ\text{C}$ . На фиг. 2 приведены зависимости температуры пара от времени в от-



Фиг. 2. Зависимость температуры пара от времени после 6 часов после работы ширм

дельных ширмах, полученные после первых шести часов работы от пуска опытной установки, при нагрузке котла 140 т/ч. Вертикальные пунктирные линии обозначают момент обдувки ширм. Из фигуры видно, что температура пара мало изменяется по времени, хотя имеет тенденцию к повышению. Повы-

шение температуры пара вызвано нестационарной работой топки, в связи с тем температура газов на выходе из топки со временем увеличивается [4]. Подобный характер изменения температуры пара в отдельных частях ширмы, приведенный на фиг. 2, наблюдался и через 70—80 ч работы ширм. Эти данные подтверждают, что на ширмах первоначально не образуется заметных отложений. Это объясняется, кроме низких температур стенки металла, еще тем, что поверхность труб в первоначальный период эксплуатации является гладкой, без развитого коррозионного слоя, что также не способствует связыванию летучей золы. После указанного времени работы ширм температура пара за каждой ширмой начинает со временем падать, что вызвано образованием на трубах ширм рыхлых отложений. Это видно из фиг. 3, где приведена зависимость температуры пара от времени при нагрузке котла 200 т/ч после 200 часов работы. Из этой фигуры видно, что температура пара за отдельными ширмами резко повышается после их обдувки, а затем начинает медленно падать. Во время проведения опытов данной серии ширмы в течение 20—30 минут обдувались два раза (см. фиг. 3). При обработке опытных данных, когда температура пара зависит от времени, для охарактеризования чистого состояния ширм за основу были взяты точки, полученные через 10—20 минут после второй обдувки.



Фиг. 3. Зависимость температуры пара от времени после 200 часов работы ширм

После 147 часовой работы опытных поперечно-обтекаемых ширм котел был остановлен и проводился тщательный осмотр ширм. Выявилось, что плотные отложения летучей золы на трубах ширм отсутствуют. На фронтальной стороне труб первого ряда были обнаружены локальные рыхлые отложения длиной 20—30 мм, покрывающие приблизительно 2—3% полной поверхности нагрева ширм. Остальная часть ширмы являлась чистой.

На основе балансовых испытаний ширм в незагрязненном состоянии были определены тепловосприятости второй и третьей ширм:

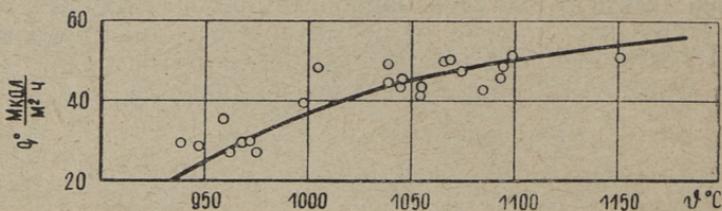
$$q^{\circ} = \frac{D \Delta i}{H}, \quad (1)$$

где  $D$  — расход пара через ширмы;

$\Delta i$  — прирост теплосодержания пара соответственно во второй и третьей ширме;

$H$  — полная поверхность ширмы.

Зависимость тепловосприятости ширмы № 2 от температуры газов перед ширмами приведена на фиг. 4. Тепловосприятие выходной ширмы является несколько ниже (на 10—20%), что вызвано вероятно повышенной температурой среды в ширме. С повышением температуры газов на 200°C тепловосприятие ширм в чистом состоянии увеличивается примерно в два раза, что указывает на то, что теплообмен в ширмах происходит главным образом за счет излучения запыленного потока газов.



Фиг. 4. Зависимость тепловосприятости ширмы № 2 от температуры газов

Чтобы определить коэффициент использования или коэффициент загрязнения поверхности нагрева в данный момент, необходимо знать в тот же момент времени тепловосприятие поверхности в незагрязненном состоянии. Для одновременного определения тепловосприятости незагрязненных и загрязненных опытных ширм были использованы  $\alpha$ -калориметры\*).

$\alpha$ -калориметр был введен в пространство между второй и третьей ширмами через лучок № 2. В каждом измерении регистрировалась время подъема *э. д. с. в* термопаре от 12 до 16 мв, чему соответствует  $\Delta t = 48,7^{\circ}\text{C}$  при температуре холодного спая  $30^{\circ}\text{C}$ .

\*) Описание методики приведено в статье настоящего сборника «О методике исследования теплообмена в поверхностях нагрева котельных агрегатов с помощью  $\alpha$ -калориметров», см. стр. 3.

Тепловосприятие  $a = \alpha$ -калориметра подсчитывалось по формуле:

$$q_a = (1 + \beta - \varphi) [q]. \quad (2)$$

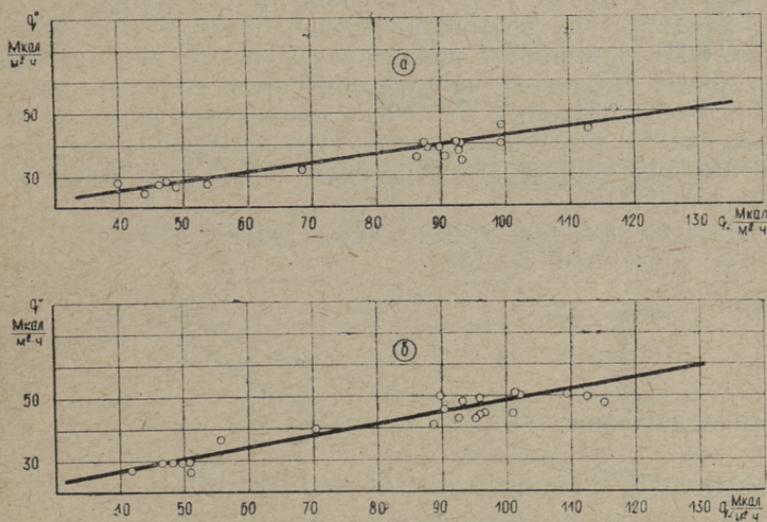
При определении коэффициентов  $\beta$  и  $\varphi$  в формуле (2) степени черноты  $\alpha$ -калориметра и труб в ширмах были приняты между собой равными  $\varepsilon_\alpha = \varepsilon_n = 0,82$ . Температура стенки при расчете коэффициента собственного излучения ширм была определена из выражения:

$$t_{ст} = \left( \frac{1}{\alpha_2} + \varepsilon_m \right) q^\circ + t_{ср}, \quad (3)$$

где  $t_{ср} = 0,5 (t' + t'')$  — средняя температура пара в данной ширме;

$\varepsilon_m$  — тепловое сопротивление стенки труб;

$\alpha_2$  — коэффициент теплоотдачи от стенки к пару, которая определялась по [2].



Фиг. 5. Зависимость тепловосприятий ширм от тепловосприятия  $\alpha$ -калориметра:  
а — ширма № 2, б — ширма № 3.

Зависимости между тепловосприятиями незагрязненных ширм  $q^\circ$  и  $\alpha$ -калориметра  $q_a$  видны из фиг. 5 и являются практически прямолинейными в области тепловосприятий  $\alpha$ -калориметра от 40 до 120  $\text{Mkcal}/\text{m}^2.\text{ч}$ .

Нужно отметить, что тепловосприятие  $\alpha$ -калориметра по высоте газохода перед опытными ширмами является непостоянным. Максимальное тепловосприятие калориметра имеет место

примерно на половине высоты газохода. Разность между максимальным и минимальным тепловосприятием калориметра по высоте газохода находится в пределах 15—25%.

### Динамика загрязнения поперечно-обтекаемых ширм

Одной из главных задач опытов было определение зависимостей, характеризующих тепловосприятие поперечно-обтекаемых ширм по времени между двумя циклами обдувки. Опыты начинались после 2300 часов работы ширм и окончились после 2900 часов работы. Во время проведения испытаний данной серии трубы исследуемых ширм были покрыты плотными сульфатными отложениями.

Опыты проводились в интервале производительности котла от 140—200 т/ч. Температура газов перед опытными ширмами изменялась от 1040 до 1175°C и скорость газов от 5,2 до 7,2 м/сек. Ширмы во время проведения опытов обдувались прибором ОПК-8, который предназначен также для очистки фестона котла. Поскольку частота обдувки фестона определяется нагрузкой котла, то и частота обдувки опытных ширм зависела от производительности котла. При изменении нагрузки котла в вышеуказанном интервале частота обдувки ширм колебалась в пределах от 0,7 до 0,2 1/ч.

Во время проведения опытов данной серии сжигаемое топливо имело следующий состав:

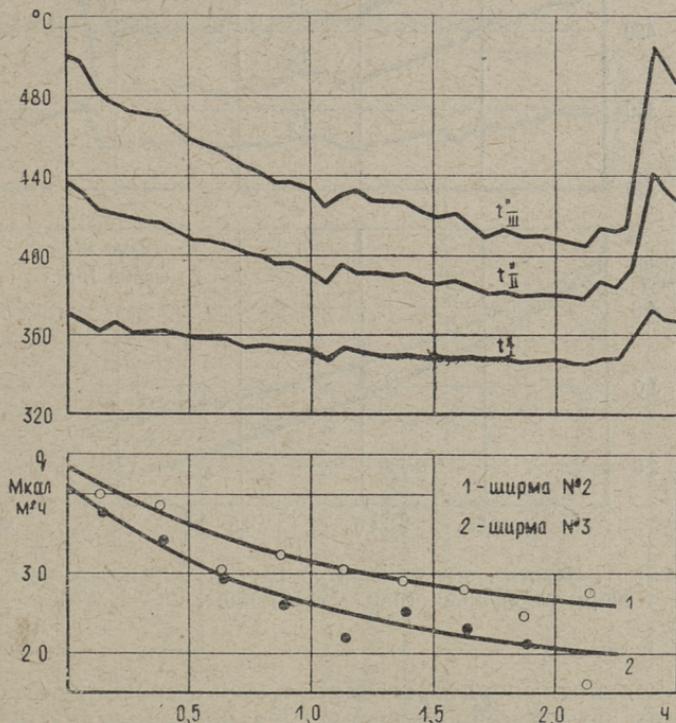
влажность	$W^p = 11,5—13,0\%$ ;
зольность	$A^p = 41,0—42,0\%$ ;
содержание двуокиси углерода	$CO_2^p = 13,5—15\%$ ;
теплота сгорания	$Q_{н}^p = 2600—2700$ ккал/кг.

Расход пара через опытные ширмы изменялся в пределах от 4,4 до 5,3 т/ч. Температуры пара были после обдувки ширм таковы: перед второй ширмой  $t''_{II} = 360—380^\circ\text{C}$ , после второй  $t''_{II} = 410—450^\circ\text{C}$  и после третьей ширмы  $t''_{III} = 460—510^\circ\text{C}$ .

Тепловой режим поперечно-обтекаемых ширм в котельных агрегатах сжигающих эстонские сланцы является резко нестационарным, т. е. температуры пара и тепловосприятие ширм зависят от времени. Для иллюстрации этого на фиг. 6 и 7 приведена зависимость температуры пара на выходе из отдельных ширм от времени в опытах №№ 12 и 18. На тех же

фигурах нанесены также кривые, показывающие зависимость тепловосприятий второй и третьей ширмы от времени. Время  $\tau = 0$  отвечает моменту окончания обдувки ширм.

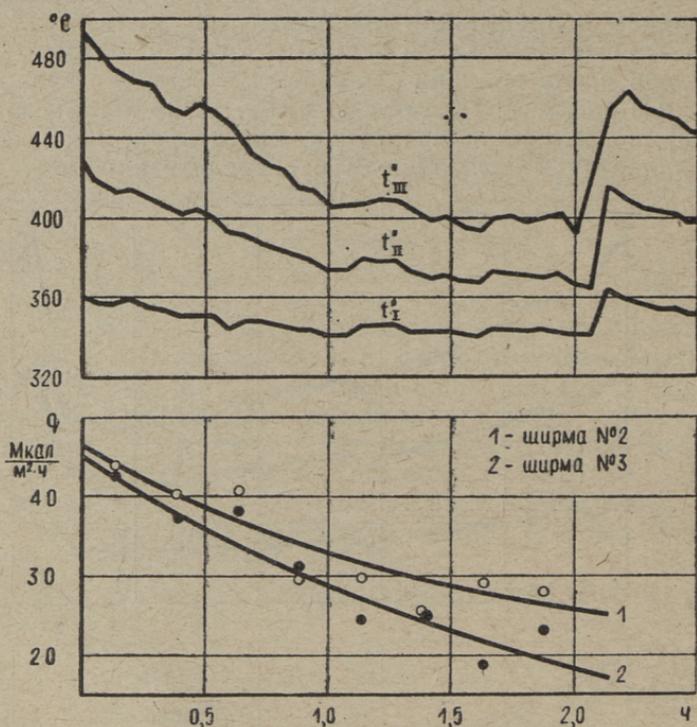
Из полученных данных выясняется, что температура пара на выходе из отдельных ширм, а также их тепловосприятие со временем непрерывно уменьшается. В опыте № 12 температура пара на выходе из второй и третьей ширм в течение двух часов после обдувки уменьшается соответственно на 55 и 90°C, а в опыте № 18 соответственно на 65 и 105°C. Из фиг. 6 и 7 видно, что тепловосприятие как второй, так и третьей ширм является максимальным непосредственно после очист-



Фиг. 6. Зависимости температур пара и тепловосприятий ширм от времени (опыт № 12) при  $\omega = 6,1$  м/сек

ки. После этого тепловосприятие ширм непрерывно падает до следующего цикла обдувки. Можно также заметить, что интенсивность снижения тепловосприятия выходной ширмы является большей, чем падение тепловосприятия средней ширмы, что вызвано вероятно более высокими температурами стенки в выходной ширме. Темп падения тепловосприятия за-

висит также от скорости газов в районе ширм, т. е. от нагрузки котла. С повышением скорости газов тепловосприятие падает более быстро, что также видно из зависимостей, приведенных на фигурах 6 и 7.



Фиг. 7. Зависимости температур пара и тепловосприятий ширм от времени (опыт № 18) при  $\omega = 7,2$  м/сек

Снижение температуры пара и тепловосприятий отдельных ширм по времени указывает на нестационарный характер теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах при сжигании сланцев. Это обстоятельство играет настолько существенную роль, что нестационарность теплообмена в ширмах подобного типа нужно учитывать как при проектировании, так и при эксплуатации.

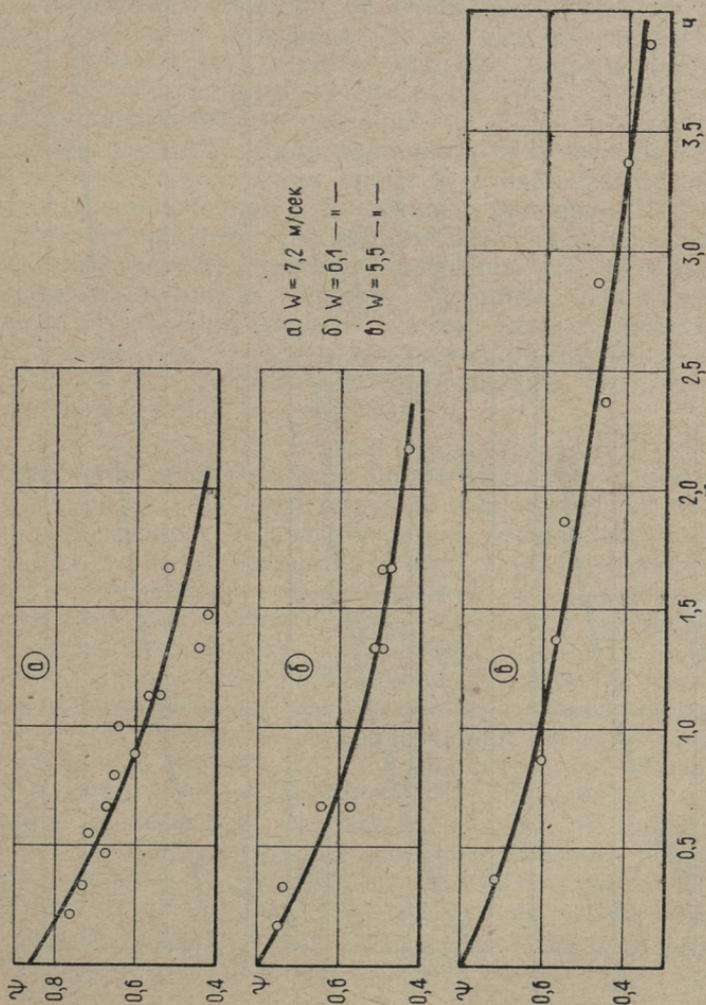
Для обобщения результатов опыта был рассчитан коэффициент использования ширм  $\psi$ . Коэффициент  $\psi$  определялся как отношение тепловосприятия загрязненной поверхности нагрева к тепловосприятию незагрязненной при прочих равных условиях (температура газов, скорость газов, темпера-

тура стенки, излучающие свойства запыленного потока газов и т. д.):

$$\psi = \frac{q}{q^0}, \quad (6)$$

где  $q$  — тепловосприятие загрязненной ширмы;  
 $q^0$  — тепловосприятие незагрязненной ширмы.

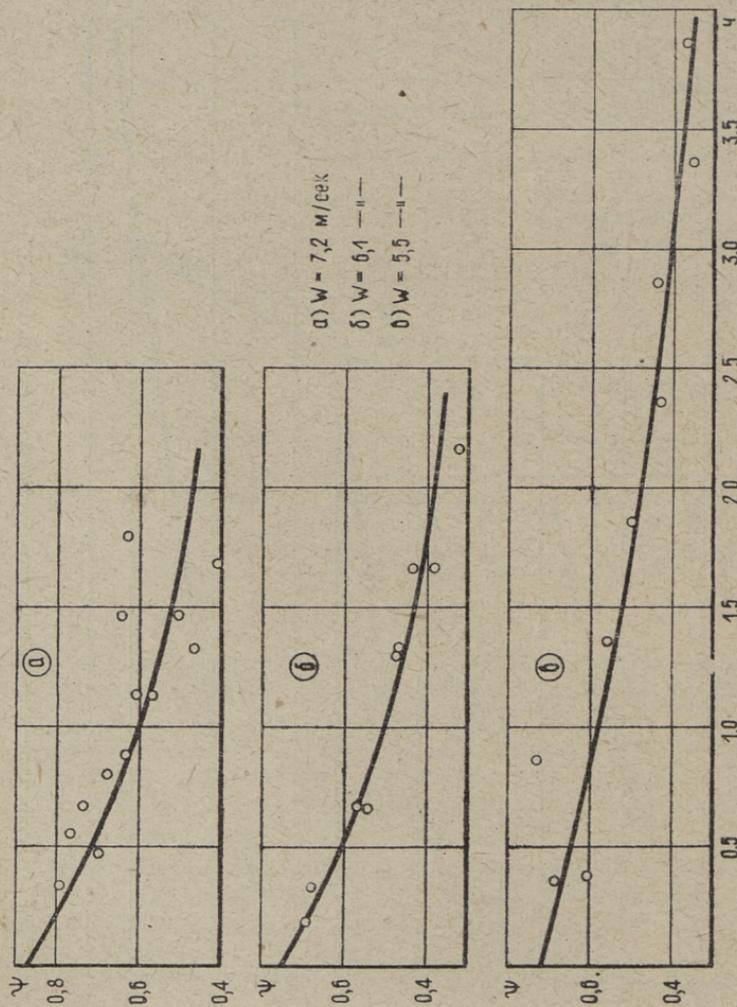
Применение коэффициента использования дает возможность значительно упростить теплотехнический расчет поверхностей нагрева по сравнению со существующей методикой [2], т. к. отпадает необходимость определения условной температуры наружных поверхностей отложений и т. п.



Фиг. 8. Зависимость коэффициента использования ширмы № 2 от времени.

Определение тепловосприятости  $q^\circ$  производилось по выше-изложенной методике с помощью  $\alpha$ -калориметра. Тепловосприятие загрязненной ширмы  $q$  определялось по прямому тепловому балансу. Поскольку температура газов на выходе из топки котла ТП-17 при сжигании сланцев со временем непрерывно повышается, то и тепловосприятие  $\alpha$ -калориметра является непостоянным. Поэтому  $q$  определялось введением калориметра в районе ширм через каждые 20—30 минут.

Коэффициент использования опытных ширм сильно зависит от времени. Это наглядно видно из фиг. 8 и 9, где приве-

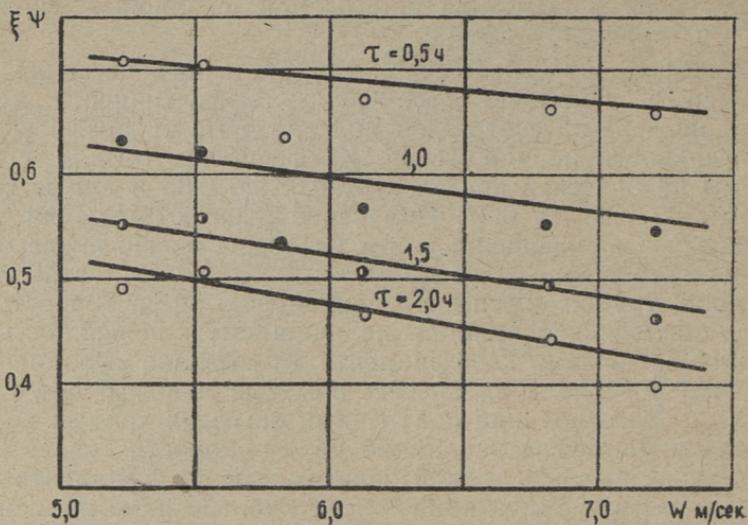


Фиг. 9. Зависимость коэффициента использования ширмы № 3 от времени

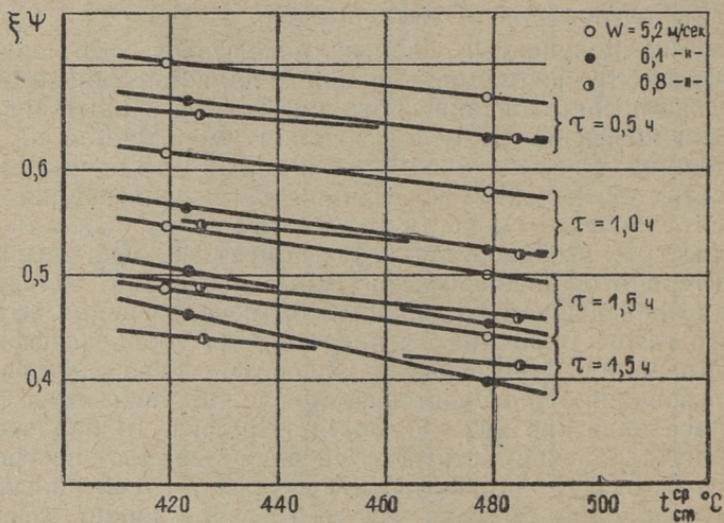
дена зависимость коэффициента использования от времени для средней и выходной ширмы при различных скоростях газов и температур стенки.

Коэффициент использования ширм непосредственно после обдувки  $\psi_1$  учитывает уменьшение эффективности поверхности нагрева за счет отложений, которые во время обдувки с поверхности не удаляются. Коэффициент  $\psi_1$  для средней ширмы находится в пределах от 0,67 до 0,85 и для выходной ширмы от 0,65 до 0,87. Получение разных значений коэффициента использования ширм непосредственно после обдувки вызвано главным образом тем, что в эксплуатационных условиях трудно обеспечить одинаковую эффективность действия обдувочного прибора на очищаемую поверхность. Некоторое колебание коэффициента  $\psi_1$  вызвано несомненно и тем, что в нескольких опытах опытные ширмы обдувались дважды. На основании полученных опытных данных не было возможно определить влияние на  $\psi_1$  скорости газов. Также не удалось выявить четкой зависимости коэффициента  $\psi_1$  от длительности эксплуатации ширм. Это очевидно объясняется близким расположением обдувочного прибора ОПК-8 к обдуваемой поверхности. Последним объясняется также и относительно высокие значения коэффициента использования непосредственно после обдувки. Средними значениями  $\psi_1$  в условиях проведения данных опытов можно принять: для средней ширмы  $\psi_1 = 0,80$  и для выходной ширмы  $\psi_1 = 0,75$ . Таким образом с повышением температуры стенки коэффициент использования  $\psi_1$  уменьшается.

Анализ полученных данных показывает, что снижение коэффициента использования ширм является максимальным сразу же после окончания обдувки. Так, за первый час после обдувки коэффициент использования уменьшается на 0,20—0,25 единиц, а за следующий час на 0,10—0,15 единиц. Интенсивность уменьшения коэффициента использования ширм зависит также от скорости газов. Чем выше скорость газов, тем быстрее уменьшается коэффициент  $\psi$ . Для выявления характера этой зависимости была построена зависимость между приведенным коэффициентом использования  $\xi\psi$  и скоростью газов. Величина  $\xi\psi$  представляет собой коэффициент использования, отнесенный к условию, когда коэффициент использования непосредственно после обдувки имел бы постоянное значение ( $\psi_1 = \text{const.}$ ). На фиг. 10 представлена упомянутая зависимость для средней ширмы, построенная при  $\psi_1 = 0,80$  ( $\xi = 0,80/\psi_1$ ) для разных  $\tau$ , отсчитанных с момента окончания обдувки. Из этой фигуры видно, что в данный момент времени зависимость  $\xi\psi$  от скорости газов для поперечно-обтекаемых ширм является практически линейной.



Фиг. 10. Зависимость коэффициента использования ширмы № 2 от скорости газов



Фиг. 11. Зависимость коэффициента использования от средней температуры стенки

При этом наклон прямых тем больше, чем больше времени прошло с начала обдувки.

Более интенсивное уменьшение коэффициента использования с повышением скорости газов хорошо согласуется с современными представлениями о механизме образования связанных отложений на поверхностях нагрева котлоагрегатов [1]. В описанных опытах критическая скорость газов (примерно 8 м/сек), ниже которой интенсивность роста связанных отложений увеличивается с увеличением скорости газов, не была превышена.

В том же направлении, что и скорость газов, влияет на коэффициент использования и температура стенки металла. Для иллюстрации этого на фиг. 11 представлена зависимость  $\xi\psi$  от средней температуры стенки непосредственно после обдувки. Средняя температура стенки была рассчитана как полу-сумма температур на входе и выходе из данной ширмы. Из этой зависимости видно, что коэффициент  $\xi\psi$  с повышением температуры стенки уменьшается.

Для обобщения полученных данных была выведена зависимость коэффициента использования поперечно-обтекаемых ширм от величин, оказывающих влияние на его абсолютное значение. При этом были приняты следующие исходные положения:

1) коэффициент  $\psi$  при  $\tau = const.$  зависит линейно от скорости газов и от средней температуры стенки;

2) исходная величина коэффициента  $\psi$  (непосредственно после обдувки) не зависит от скорости газов.

Полученная формула имеет вид:

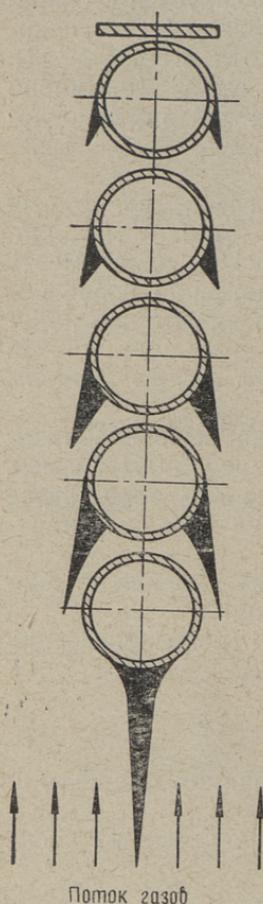
$$\psi = 1,07 - 0,035 \omega \tau - 0,00065 t_{ст}, \quad (7)$$

где  $\tau$  — время, отсчитанное с момента окончания обдувки, ч;  
 $\omega$  — скорость газов, м/сек;

$t_{ст}$  — средняя температура стенки непосредственно после обдувки, °С.

Поскольку формула (7) является эмпирической, то пределы ее применения ограничиваются диапазоном изменения определяющих величин в опытах:  $\tau = 0-5$  ч,  $\omega = 4,5-7,5$  м/сек и  $t_{ст} = 400-500$ °С.

## Характер загрязнения и высокотемпературная коррозия поперечно-обтекаемых ширм



Фиг. 12. Характер загрязнения ширм

и для третьей 2,0—3,0 мм, что в пересчете на 1000 часов работы ширм составляет величину 0,19—0,27, 0,39—0,60 и 0,77—1,12 мм/1000 ч.

Поскольку интенсивность износа труб сильно зависит от температуры стенки, то можно предположить, что износ, как и на ширмах котла ТП-17 [1], носит коррозионный харак-

После 2590 часов работы был проведен детальный осмотр опытных ширм \*). При осмотре выяснилось, что характер загрязнения ширм зависит от температуры поверхности труб. Общий уровень загрязненности у первой ширмы был меньше, чем у второй и третьей ширмы.

Активный радиус действия обдувочного прибора ОПК-8 находится в пределах 1,2—1,5 м. В этом районе ширмы наиболее чистые и в отдельных местах очищаются до металла.

Типичный характер загрязнения поперечно-обтекаемых ширм виден из фиг. 12. Длина боковых гребней максимально доходит до 20—30 мм на обеих ширмах.

Во время осмотра ширмы был обнаружен сильный износ труб всех ширм в радиусе активного действия обдувочного прибора. За это время (2590 часов) ширмы обдувались 1123 раза, т. е. в среднем через 2 часа 18 минут. На фиг. 13 представлена деталь изношенной выходной ширмы. В указанное время котел работал со средней нагрузкой 160 т/ч. Средние температуры металла стенки труб при этом были равны: для входной ширмы 360—380°C, для средней 400—420°C и для выходной ширмы 440—460°C. Износ труб был неравномерный. Четко видно, что с повышением температуры стенки интенсивность износа увеличивается. Измеренный максимальный износ был для первой ширмы 0,5—0,7 мм, для второй 1,0—1,5 мм

\* См. также статья на стр. 51.

тер, вызванный воздействием на металл отдельных компонентов сланцевой золы в сочетании с сильной обдувкой поверхностей прибором ОПК-8.



Фиг. 13. Вид на деталь изношенной ширмы № 3

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегатов. Эстонское государственное издательство, 1961.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.
3. И. П. Эпик, И. Р. Микк и Э. Я. Ратник. О расчете теплопередачи полурадационных ширмовых поверхностей нагрева. Изв. вузов — Энергетика, № 3, 1960.
4. И. П. Эпик, А. А. Отс. О коэффициенте загрязнения топки при пылевидном сжигании сланцев. Изв. вузов — Энергетика, № 8, 1962.



УДК 621.182.001.5

*А. А. Отс, В. И. Резник*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА В ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВИБРООЧИСТКИ

За последнее время в котельных агрегатах для очистки поверхностей нагрева все более широкое применение находит вибрационный метод очистки. Виброочистка используется как для очистки конвективных, так и ширмовых поверхностей. Несложная конструкция виброустройств, невысокие затраты на ремонт и эксплуатацию дают этому методу очистки преимущества по сравнению с паровой обдувкой, а в отдельных случаях и перед дробеочисткой. Для сланцевых котлов применение виброочистки позволяет резко уменьшить скорости протекания процессов высокотемпературной коррозии труб поверхностей нагрева.

Опыт эксплуатации большого числа котлов, сжигающих сланцы, и в первую очередь котлов ТП-17 показал, что вопросы очистки поверхностей нагрева при сжигании этого вида топлива являются первостепенными, а в целом ряде случаев и определяющими. В этих условиях широкое использование в котлах виброочистки будет вероятно особенно перспективным для сланцевых котлов большой мощности.

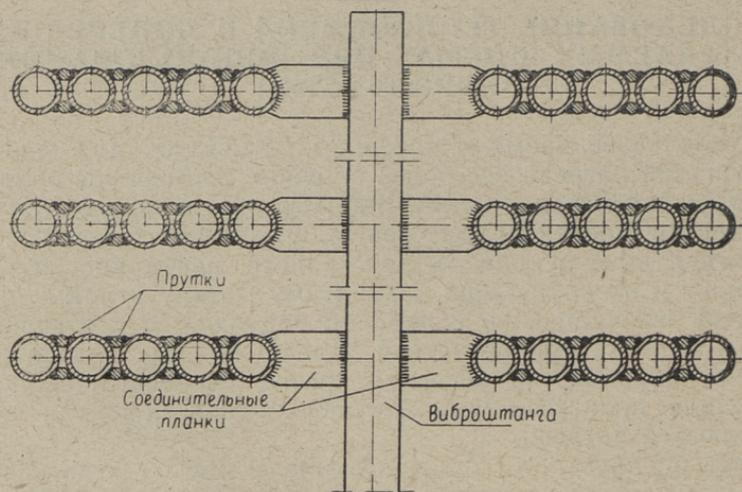
Несмотря на это, до сих пор нет достаточных материалов для оценки эффективности виброустройств, данных, характеризующих динамику загрязнения поверхностей при виброочистке, т. е. данных об изменении тепловой эффективности по времени.

В настоящей статье приведены результаты исследования условий теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах, установленных в переходном газоходе котла ТП-17\*) и анализируются изменения коэффициента использования во времени при использовании виброочистки.

После 3200 часов работы с паровой обдувкой опытные

\*) См. стр. 13 настоящего сборника.

поперечно-обтекаемые ширмы были переведены на поперечную виброочистку. Ширмы были соединены между собой виброштангой, на торце которой установлен вибратор типа С-414 с числом оборотов 2800 *об/мин* и мощностью 0,8 *квт*. Охлаждаемая водой виброштанга находилась в середине разрыва между ширмами на расстоянии 0,45 м от изгиба труб. Виброштанга была соединена с трубами ширм при помощи планок из нержавеющей стали. Трубы были между собой соединены прутками диаметром 10 мм. Схема соединения виброштанги с ширмами видна из фиг. 1.



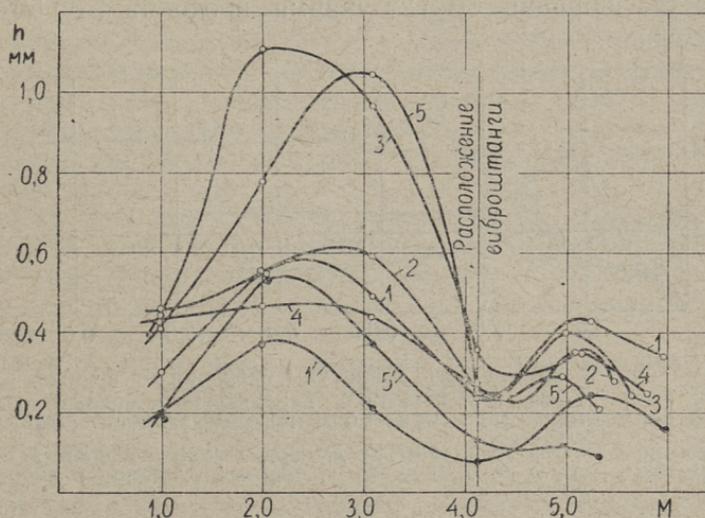
Фиг. 1. Схема соединения виброштанги

Одновременно с переводом опытных ширм на виброочистку, обдувочный прибор ОПК-8 был реконструирован по схеме прибора ОПК-9 с тем, чтобы уменьшить влияние действия обдувочной струи на исследуемые ширмы. Поскольку тем же обдувочным прибором очищается также фестон котла, то совсем отказаться от обдувки в близости опытных ширм оказалось невозможным.

### Амплитудная характеристика ширм

Для снятия амплитудных и частотных характеристик опытных поперечно-обтекаемых ширм был использован ручной виброграф. При снятии виброграмм соотношение между следом на ленте и проходом иглы было 6:1.

Вибрационная характеристика снималась при двух режимах: 1) при постоянной работе вибратора, 2) при пуске вибратора. Вибрационные характеристики были сняты в двух направлениях: перпендикулярно и параллельно к виброштанге. Более детально была изучена виброхарактеристика выходной ширмы.



Фиг. 2. Вибрационная характеристика ширм при постоянной работе вибратора:

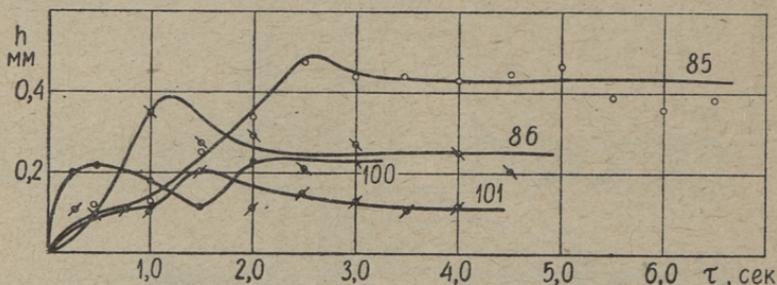
- 1, 2, 3... — №№ труб;
- 1 — 5 — амплитуды параллельно к виброштанге;
- 1', 5' — амплитуды перпендикулярно к виброштанге

Амплитуды вибрации отдельных труб в ширме приведены на фиг. 2. На вертикальной оси нанесена амплитуда вибрации, а на горизонтальной оси — расстояние от коллектора. Кривые получены при постоянной работе вибратора. Из этих данных видно, что амплитуда вибрации по высоте труб меняется. Максимальные амплитуды имеют место примерно на половине высоты труб и достигают до 1,1 мм. В районе расположения виброштанги амплитуды вибрации в параллельном направлении к виброштанге у всех труб были одинаковы — ~ 0,25 мм. Амплитуды вибрации при поперечном направлении к виброштанге примерно в два раза меньше.

Из полученных результатов также видно, что максимальные и минимальные амплитуды вибрации в отдельных трубах значительно отличаются друг от друга. Так, например, максимальные амплитуды вибрации труб № 4 и 5 отличаются друг

от друга в два с лишним раза. Такая большая разница вероятно вызвана особенностями креплений отдельных труб в ширмах.

Средние амплитуды вибрации при параллельном направлении к виброштанге составляют не менее 0,4 мм. Частота вибрации на отдельных участках ширм при постоянной работе вибратора в основном одинакова — около 50 1/сек. При длительности вибрации 30 сек ширма проходит  $\sim 30 \cdot 50 = 1500$  вибраций.



Фиг. 3. Зависимость амплитуды вибрации от времени:

- № 85 — труба № 5,  $H = 1,0$  м, параллельно к виброштанге;
- № 86 — труба № 5,  $H = 1,0$  м, перпендикулярно к виброштанге;
- № 100 — труба № 5,  $H = 4,1$  м, параллельно к виброштанге;
- № 101 — труба № 5,  $H = 4,1$  м, перпендикулярно к виброштанге;

Вибрационная характеристика, полученная при пуске вибратора представлена на фиг. 3. Здесь на вертикальной оси нанесены амплитуды, а на горизонтальной оси — время, отсчитанное от пуска вибратора. Из этих данных видно, что амплитуды вибрации стабилизируются проходя через максимум.

### Условия проведения опытов

Исследования были проведены в интервале производительности котла 133—183 т/ч. Изменение нагрузки котла дало возможность изменять температуру газов перед опытными ширмами в пределах от 990 до 1180°C и скорости газов от 3,8 до 6,7 м/сек. Расход пара через опытные ширмы колебался в пределах от 2,9 до 5,8 т/ч, тем самым регулировались температура пара и стенки металла труб опытного пароперегревателя. Температуры пара на выходе из отдельных ширм во время проведения опытов непосредственно после очистки изменялись в следующих пределах: после входной ширмы —  $t''_I = 330—410^\circ\text{C}$ ; после средней ширмы —  $t''_{II} = 350—490^\circ\text{C}$  и после выходной ширмы —  $t''_{III} = 380—560^\circ\text{C}$ .

При проведении опытов данной серии состав сланца колебался в следующих пределах: влажность  $W^p = 9,8—14,1\%$ , зольность  $A^p = 39,8—47,5\%$ , содержание карбонатной двуокиси углерода  $CO_2^p = 13,7—19,5\%$ , теплота сгорания  $Q_{н}^p = 2006—2739$  ккал/кг.

Несмотря на то, что обдувочный прибор ОПК-8 в районе опытных ширм работал по схеме прибора ОПК-9 с дросселированием давления пара при переходе вблизи плоскостей ширм, исключить его влияние на условия работы исследуемых ширм не удалось. В среднем эффективность действия одного цикла работы обдувочного прибора ОПК-9 была равна эффективности действия виброочистки. Поэтому была использована следующая методика проведения опытов. Вибрация ширм проводилась через 0,3—1,0 часов после окончания обдувки прибором ОПК-9. Перед новой обдувкой за 0,3—1,0 часов проводилась новая вибрация. Принятая методика дала возможность определить повышение тепловосприятости ширм за счет вибрации, а также и скорости падения тепловосприятости между циклами вибрации.

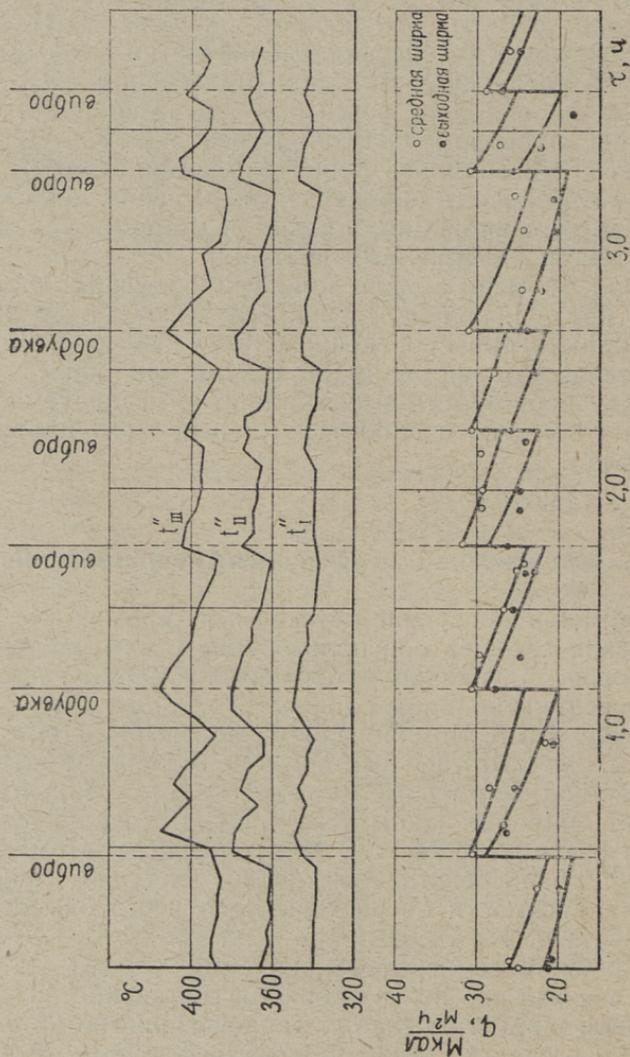
Интервал времени между циклами обдувки определялся нагрузкой котла и колебался в пределах от 1,5 до 2,5 часа. Режим вибрации при проведении опытов был одинаковый — продолжительность вибрации 30 секунд. За время работы котла между периодами опытов вибратор исследуемых ширм включался совместно с вибраторами основного пароперегревателя котла.

### Тепловосприятие и коэффициент использования

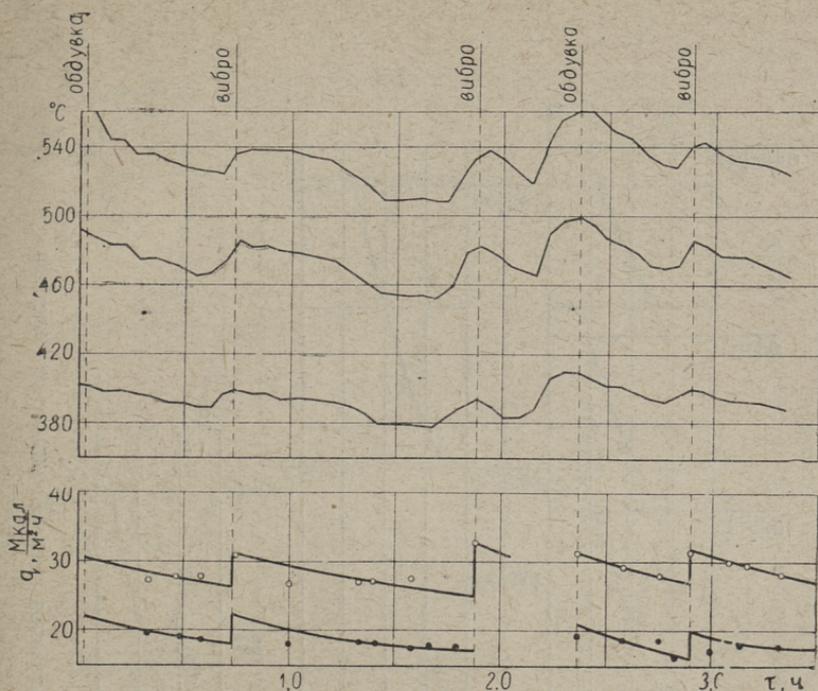
Теплообмен в поперечно-обтекаемых ширмах при сжигании эстонских сланцев с использованием как виброочистки так и паровой обдувки является нестационарным процессом, т. е. тепловосприятие ширм со временем падает. Это наглядно видно из фиг. 4 и 5, где приведены зависимость температуры пара на выходе из отдельных ширм и тепловосприятие средней и выходной ширмы по времени. Из этих данных видно, что за счет вибрации ширм температура пара на выходе из всех ширм резко повышается. Температура пара также резко повышается непосредственно после обдувки аппаратом ОПК-9. В зависимости от расхода пара через опытные ширмы, температура пара повышается на 25—80°C. В среднем скорость падения температуры пара на выходе из второй ширмы за первый час после вибрации составляла 40 град/ч, а для выходной ширмы 50 град/ч. Тепловосприятие второй ширмы является несколько выше, чем третьей ширмы. Так, тепло-

восприятие средней (второй) ширмы в зависимости от температуры газов меняется в пределах 17—40  $\text{Мкал}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ , а тепло-восприятие выходной ширмы в среднем на 2—8  $\text{Мкал}/\text{м}^2\cdot\text{ч}$  меньше.

Сравнивая скорости падения тепловосприятия отдельных ширм после обдувки прибором ОПК-8 и после виброочистки или обдувки аппаратом ОПК-9, видно, что в последних случаях эта величина падает менее резко. Это объясняется более эффективным действием обдувочного прибора ОПК-8.



Фиг. 4. Зависимость температуры пара и тепловосприятий от времени при температуре  $\phi = 1137^\circ\text{C}$  и скорости газов  $w = 6,4 \text{ м/сек}$

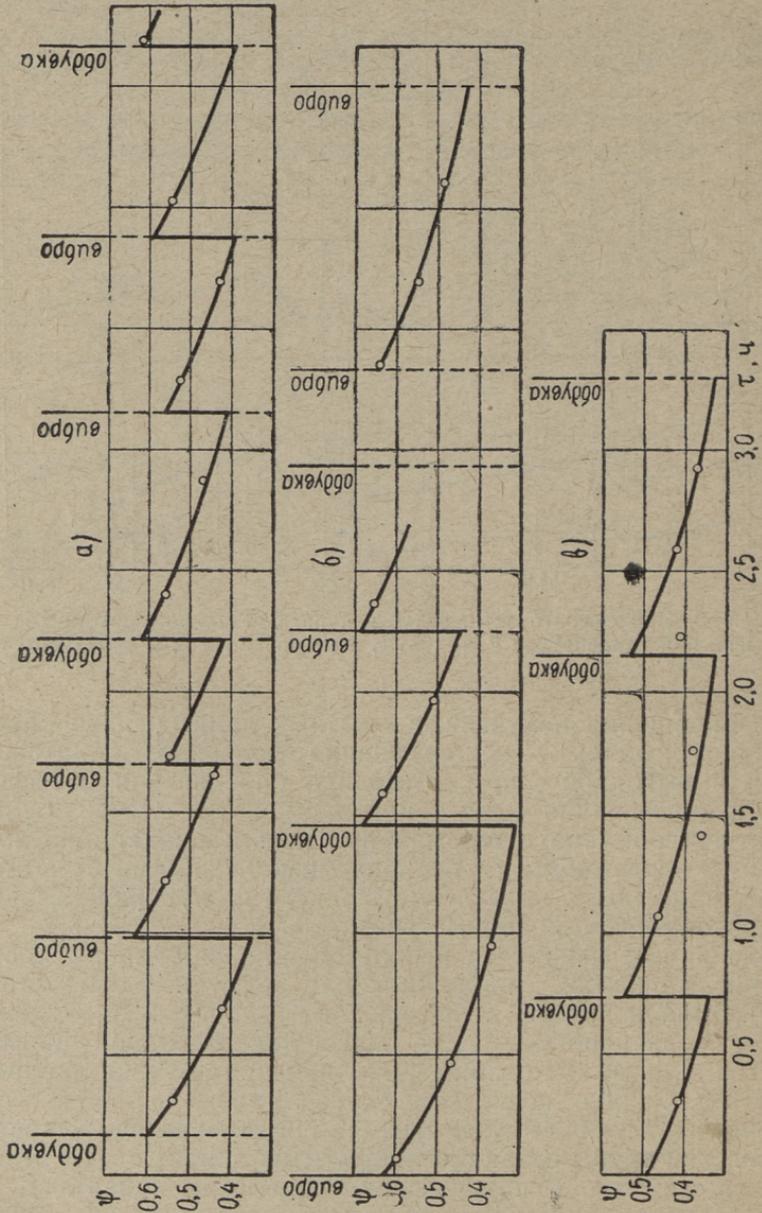


Фиг. 5. Зависимость температуры пара и тепловосприятий от времени при температуре  $\vartheta = 1031^\circ\text{C}$  и скорости газов  $\omega = 4,6 \text{ м/сек}$

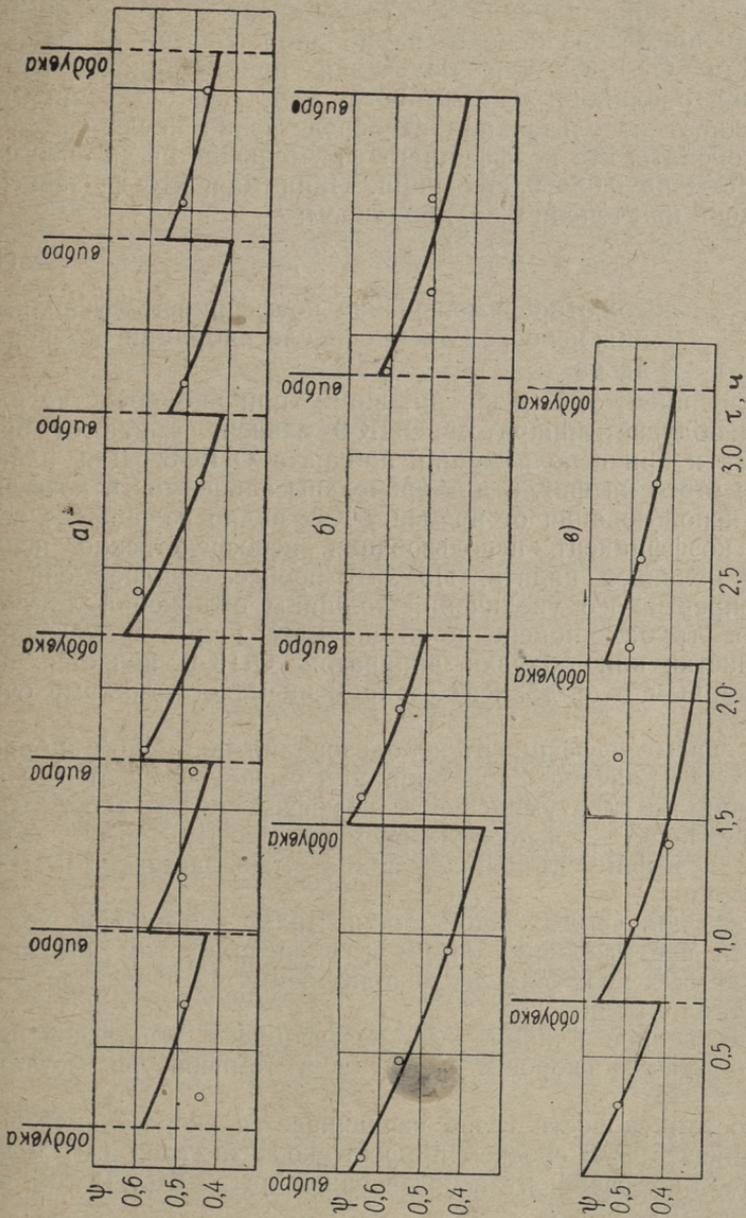
Для обобщения полученных опытных данных были определены коэффициенты использования поверхности нагрева средней и выходной ширм. Методика определения коэффициента использования была такой же, как и в случае исследования теплообмена в ширмах при использовании паровой обдувки. В зависимости от периода между циклами отчистки опытных ширм было проведено от одного до четырех измерений (при помощи  $\alpha$ -калориметров).

Значения коэффициента использования ширм непосредственно после очистки (вибрация или обдувка аппаратом ОПК-9) были получены в пределах  $\psi_1 = 0,50-0,70$ , в среднем для средней ширмы  $\psi_1 = 0,60$  и для выходной ширмы  $\psi_1 = 0,55$ , т. е. на 0,2 единиц ниже, чем при обдувке аппаратом ОПК-8. Если в последнем случае трубы в районе эффективного действия обдувки очищаются до металла, то после виброочистки трубы остаются покрытыми тонким слоем отложений, за счет чего и снижается значение коэффициента  $\psi_1$ .

Четкой зависимости коэффициента использования непосредственно после вибрации от длительности работы ширм



Фиг. 6. Зависимость коэффициента использования средней ширмы от времени  
 (а —  $t_{cp} = 375^\circ \text{C}$ ; б —  $t_{cp} = 400^\circ \text{C}$ ; в —  $t_{cp} = 350^\circ \text{C}$ )



Фиг. 7. Зависимость коэффициента использования выходной ширмы от времени (а —  $t_{cr} = 405^\circ \text{C}$ ; б —  $t_{cr} = 440^\circ \text{C}$ ; в —  $t_{cr} = 373^\circ \text{C}$ )

выявить не удалось. Это вызвано повидимому тем, что во время механической очистки фестона в текущих ремонтах котла в некоторой степени всегда очищалась и опытная ширма. Определенное влияние на коэффициент  $\psi_1$  также оказывало одновременное использование виброочистки и обдувки аппаратом ОПК-9. Для получения приближенного представления о влиянии длительности эксплуатации ширм на коэффициент использования непосредственно после очистки, можно оценить, что коэффициент  $\psi_1$  уменьшается за 1000 часов работы на 0,05—0,06 единиц. Принимая, что  $\psi_1$  зависит от времени на степени 0,5\*), получаем:

$$\Delta\psi_1 = 0,002 \sqrt{Z}, \quad (1)$$

где  $\Delta\psi_1$  — абсолютное уменьшение коэффициента использования непосредственно после вибрации в течение  $Z$  часов.

Коэффициент использования ширм при виброочистке или паровой обдувке аппаратом ОПК-9 зависит также от времени как и при использовании аппарата ОПК-8. Для иллюстрации этого на фиг. 6 и 7 приведены зависимости коэффициента использования от времени. Как видно из приведенных фигур, коэффициент использования непосредственно после очистки начинает падать. Поэтому процесс теплообмена за счет непрерывного увеличения толщины отложений летучей золы на трубах поперечно-обтекаемых ширм в условиях виброочистки или обдувки аппаратом ОПК-9 является нестационарным, т. е. зависит от времени между циклами очистки.

В среднем коэффициент использования ширм при виброочистке через полчаса после вибрации уменьшается от 0,10 до 0,15 единиц. Далее уменьшение коэффициента  $\psi$  происходит более медленно. В интервале времени 0,5—1,0 часов после очистки коэффициент использования уменьшается на 0,07 — 0,10 единиц.

Анализ полученных данных показывает, что падение коэффициента использования ширм  $\psi$  происходит тем быстрее, чем выше был коэффициент использования  $\psi_1$  непосредственно после вибрации.

Существенное влияние на коэффициент использования оказывает также скорость газов  $\omega$  и температура металла труб.

С ростом скорости газов увеличивается скорость падения коэффициента  $\psi$ . В среднем прирост скорости газов на 1 м/сек уменьшает коэффициент использования на 5—6%. В том же

\*) См. формула на стр. 29.

направлении влияет температура стенки металла. С повышением температуры стенки частицы летучей золы связываются более прочно между собой и с поверхностью. Повышение температуры металла на 100°C уменьшает коэффициент использования на 9—10%. Таким образом нестационарность теплообмена в условиях данных опытов тем больше, чем выше скорости газов и температура стенки.

Поскольку зависимость коэффициента использования от  $\tau$ ,  $w$  и  $t_{ст}$  такая же, как при паровой обдувке аппаратом ОПК-8, и учитывая то, что скорость снижения  $\psi$  зависит от коэффициента использования непосредственно после очистки, можно формулу для определения  $\psi$  представить в виде:

$$\psi = 1,07 - 0,035 w \sqrt{\tau + \tau_0} - 0,00065 t_{ст}, \quad (2)$$

где

- $\tau$  — время, отсчитанное непосредственно после очистки, ч;
- $w$  — скорость газов, м/сек;
- $t_{ст}$  — средняя температура стенки непосредственно после очистки, °С;
- $\tau_0$  — время, характеризующее эффективность действия способа очистки, ч.

Время  $\tau_0$  является тем меньше, чем эффективнее действует очистка. В последней формуле  $\tau_0 = 0$  при обдувке аппаратом ОПК-8,  $\tau_0 = 0,5 - 0,7$  ч при виброочистке и обдувке аппаратом ОПК-9.

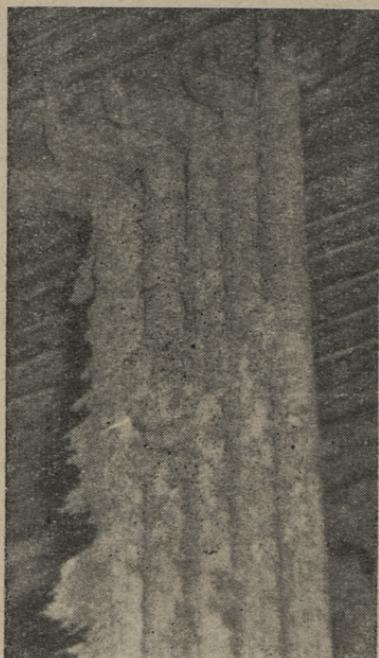
### Характер загрязнения ширм

Во время работы опытных поперечно-обтекаемых ширм в условиях виброочистки и паровой обдувки аппаратом ОПК-9 было проведено два осмотра ширмы при остановке котла. Первый осмотр был проведен примерно после 4400 часов, а другой после 6950 часов работы ширм.

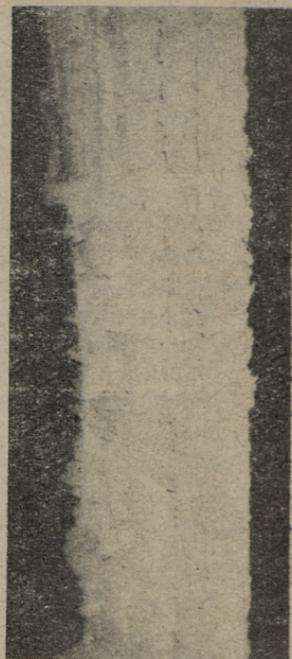
Во время этих осмотров выявилось, что все ширмы покрыты слоями отложений. Если в условиях работы при использовании для очистки ширм обдувочного прибора ОПК-8 локально поверхность очищалась до металла, то при виброочистке это не имело место. Из обоих осмотров выявилось, что толщина отложений растет с повышением температуры стенки металла. Поэтому наиболее сильно загрязнялась выходная ширма.

На первых трубах по ходу газов видны наросты длиной до 150—200 мм. На боковых сторонах труб были отложения толщиной 2—10 мм. На последних трубах по ходу газов длинные отложения отсутствовали. Тыльная часть труб была покрыта плотным тонким слоем отложений. По высоте труб толщина

отложений является неравномерной. Верхняя и нижняя части ширмы покрыты отложениями более сильно, чем ее средняя часть. Это вызвано, во-первых тем, что в средней части ширмы амплитуды вибрации являются максимальными.



Фиг. 8. Общий характер загрязнения средней ширмы.



Фиг. 9. Общий характер загрязнения выходной ширмы.

Общий характер загрязнения ширм при виброочистке виден из фотоснимков, приведенных на фигурах 8 и 9.

Сравнивая характер загрязнения в данном случае с характером загрязнения при обдувке прибором ОПК-8, можно утверждать, что при виброочистке ширмы покрыты отложениями более равномерно и связаны с трубами более прочно. Можно утверждать, что отложения на трубах при использовании виброочистки со временем уплотняются.

Во время осмотра ширм заметного износа труб, как это имело место при обдувке аппаратом ОПК-8, зафиксировано не было.

УДК 621.182.001.12

*А. А. Отс, В. И. Резник*

## НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМ ДЛЯ СЛАНЦЕВЫХ КОТЛОВ

Результаты опытов по исследованию тепловой эффективности поперечно-обтекаемых ширм в широком диапазоне изменения скоростей газов и температур стенок при очистке их паровой обдувкой и виброустройствами позволили выработать некоторые рекомендации по проектированию ширмовых поверхностей нагрева сланцевых котлов. Часть из этих рекомендаций могут быть использованы также при проектировании котлов для сжигания других топлив.

Одним из наиболее важных результатов исследований является то, что в процессе их выполнения была установлена нестационарность процесса теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах при сжигании сланцев. Этот вывод может быть распространен и на котлы, сжигающие другие виды твердых топлив, где поверхности нагрева в котельных агрегатах работают в условиях периодической их очистки и теплообмен между газами и внутренней средой происходит в нестационарных условиях. Нестационарность процесса теплообмена определяется также изменением количества, а в целом ряде случаев и свойствами отложений по времени между циклами очистки поверхностей. В настоящее время расчетные материалы приведены в нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов ВТИ-ЦКТИ [1], которые исходят из того положения, что процесс теплообмена при постоянной нагрузке котла является стационарным. Это обстоятельство в целом ряде случаев (например, при сжигании сланцев) может привести к существенным ошибкам при проектировании котлов и оно должно быть пересмотрено.

Нестационарность теплообмена состоит в том, что при постоянной тепловой нагрузке (производительности) котла коэффициент использования поперечно-обтекаемых ширм является функцией времени, уменьшаясь между циклами очистки.

Исследования показали, что значение коэффициента использования поперечно-обтекаемых ширм непосредственно после очистки, т. е. ее максимальное значение, зависит от способа очистки. При обдувке аппаратом ОПК-8 коэффициент использования непосредственно после очистки  $\psi_1 = 0,75-0,80$ , при обдувке аппаратом ОПК-9 и виброочистке  $\psi_1 = 0,55-0,60$ . Коэффициент использования уменьшается тем быстрее, чем больше  $\psi_1$ , т. е. чем эффективнее действует способ очистки. Из этого можно сделать вывод, что теплообмен в поперечно-обтекаемых ширмах более стабилен при меньших значениях коэффициента  $\psi_1$ . Например, при скорости газов  $w = 6$  м/сек и температуре стенки  $t_{ст}^{cp} = 500^\circ\text{C}$  коэффициент использования при  $\psi_1 = 0,75$  уменьшается на 0,15 единиц в течение 0,5 часов, а при  $\psi_1 = 0,60$  в течение 1,5 часов.

Обозначим предельную разность коэффициентов использования  $\Delta\psi_{пред} = \psi_{макс} - \psi_{мин} = \psi_1 - \psi_{мин}$ . При проектировании пароперегревателей ширмового типа необходимо исходить из максимального значения коэффициента использования  $\psi_{макс}$  и из  $\Delta\psi_{пред}$ .

Выключаемая поверхность ширм за счет уменьшения тепловосприятия по времени и диапазон регулирования температуры перегретого пара являются связанными с собой величинами. С увеличением разности  $\Delta\psi_{пред}$  увеличивается как выключаемая поверхность нагрева за счет загрязнения, так и тепловая мощность регулятора перегрева. При  $\psi = \psi_{макс}$  выключаемая поверхность нагрева  $\Delta H = 0$  и используемая мощность регулятора температуры перегретого пара является максимальной (при постоянной мощности котла).

Очевидно, чем меньше  $\Delta\psi_{пред}$ , тем меньше должен быть период между очистками поверхности нагрева. Это положение иллюстрируется на фиг. 1. Период между очистками при заданном  $\psi_{мин} = \psi_{макс} - \Delta\psi_{пред}$  можно приближенно рассчитать из формулы:

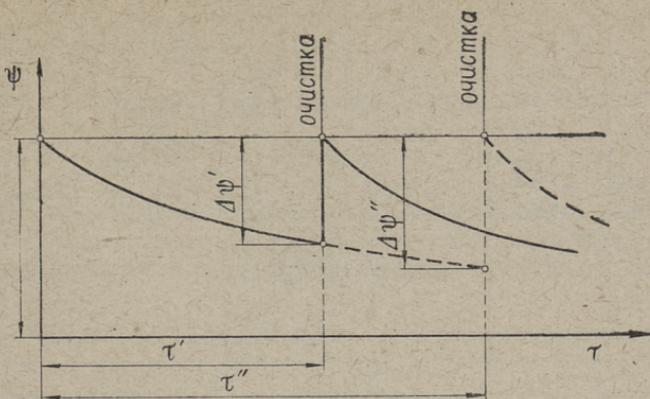
$$\tau = \left( \frac{30,6 - 0,0186 \cdot t_{ст}^{cp} - 28,6 \psi_{мин}}{w} \right)^2 - \tau_0, \quad (1)$$

где  $t_{ст}^{cp}$  — средняя температура стенок,  $^\circ\text{C}$ ;

$w$  — скорость газов, м/сек;

$\tau_0$  — время, характеризующее эффективность действия очистки, ч.

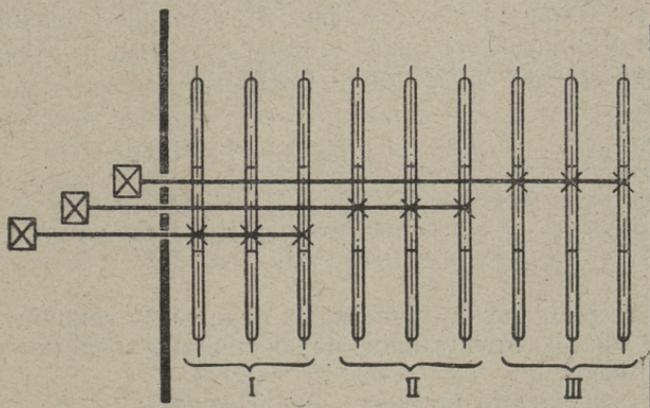
Таким образом, при проектировании поперечно-обтекаемых ширмовых пароперегревателей котлов большой мощности для сжигания сланцев в процессе проектирования должен быть задан диапазон изменения коэффициента использования. При одном и том же значении коэффициента использования непосредственно



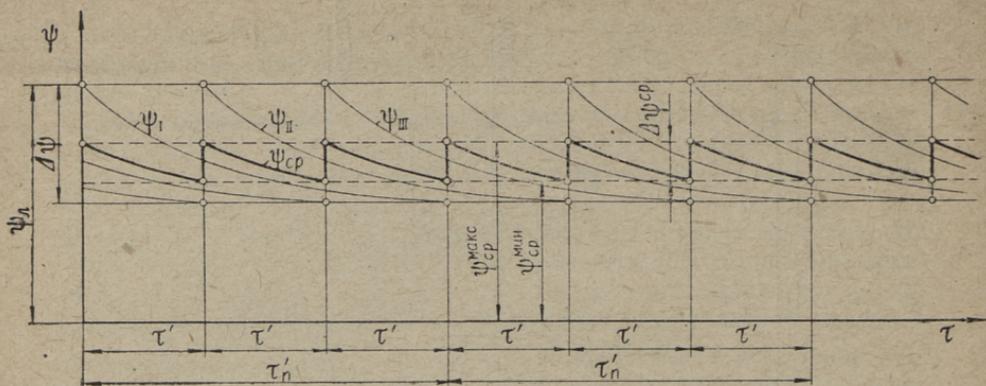
Фиг. 1. Зависимость коэффициента использования от времени

редственно после очистки поверхности нагрева необходимо стремиться к минимальным значениям  $\Delta\psi_{\text{пред}}$ . В этих условиях конечная эффективность применения виброочистки, несмотря на более низкие первоначальные значения  $\psi_{\text{макс}} = 0,55-0,60$  вместо 0,80 при паровой обдувке аппаратом ОПК-8 будет выше, поскольку частое применение обдувки из-за сильного износа труб, а также вследствие целого ряда эксплуатационных недостатков не может быть рекомендовано, в то время как простые виброустройства с менее эффективным действием могут включаться значительно чаще.

Для стабилизации теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах можно рекомендовать использовать секционированную виброочистку, например, по схеме приведенной на фиг. 2,



Фиг. 2. Схема секционной виброочистки



Фиг. 3. Характеристика секционной виброочистки

где показана трехсекционная вибрация. По этой схеме очистка всех ширм производится не одновременно, а последовательно отдельными секциями по определенному периоду. Изменения коэффициента использования ширм при секционированной виброочистке по приведенной схеме условно показано на фиг. 3. Если время полного цикла очистки обозначить через  $\tau'_n$ , то период очистки между циклами вибрации отдельных секций равен  $\tau' = \tau'_n/n$ . Здесь  $n$  обозначает количество секций.

При применении секционированной виброочистки каждая секция работает по самостоятельной характеристике. Поскольку характеристики  $\psi = \psi(\tau)$  для отдельных секций между собой сдвинуты, то колебания средних значений коэффициента использования будут меньшими, чем для схемы, где все ширмы очищаются одновременно (см. фиг. 3). Средние значения коэффициента использования для ширмы в целом в зависимости от времени можно рассчитать по формуле:

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} H_i \psi [(i-1) \tau' + \tau]}{\sum_{i=1}^{i=n} H_i}, \quad (2)$$

- где  $\tau'$  — период между очистками отдельных секций;  
 $\tau$  — время, отсчитанное от окончания очистки данной секций;  
 $H_i$  — поверхность нагрева данной секции;  
 $n$  — число секций.

Если  $H_1 = H_2 = \dots = H_n$ , то

$$\psi_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \psi [(i-1)\tau' + \tau]}{n}. \quad (3)$$

Очевидно, что коэффициент использования ширм в целом зависит от периода очистки  $\tau'_n/n$ . Предельные значения средних коэффициентов использования определяются формулами:

$$\psi_{\text{ср. макс}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} H_i \psi [(i-1)\tau' + \tau]}{\sum_{i=1}^{i=n} H_i}, \quad (4)$$

$$\psi_{\text{ср. мин.}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} H_i \cdot \psi (i \tau)}{\sum_{i=1}^{i=n} H_i}. \quad (5)$$

Из полученных формул видно, что разность  $(\Delta\psi_{\text{ср}})_{\text{пред}} = \psi_{\text{ср. макс}} - \psi_{\text{ср. мин}}$  будет тем меньше, чем больше число секций. Например, при  $\omega = 6$  м/сек,  $t_{\text{ст}}^{\text{ср}} = 500^\circ\text{C}$ ,  $\tau' = 2$  ч при  $n = 1$  —  $(\Delta\psi_{\text{ср}})_{\text{пред}} = 0,18$ ;  $n = 2$  —  $0,15$ ;  $n = 3$  —  $0,13$ . Однако нужно отметить, что с увеличением секции максимальный средний коэффициент использования снижается. При увеличении количество секций от 1 до 2,  $\psi_{\text{ср. макс}}$  снимается на  $\sim 0,1$  единиц, а при увеличении секций с 4 до 5  $\psi_{\text{ср. макс}}$  уменьшается на  $\sim 0,05$  единиц.

При проектировании ширмовых пароперегревателей определяющим при выборе величины поверхности является минимальное значение коэффициента использования, который при секционной очистке будет выше (фиг. 3). Основываясь на данных, полученных при использовании поперечно-обтекаемых ширм, можно рекомендовать при проектировании пароперегревателя выполнить его очистку секционной из 2—3 секций при периоде  $\tau = 1,5$  —  $2,0$  часа, что отвечает  $(\Delta\psi_{\text{ср}})_{\text{пред}} = 0,10$ — $0,15$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). Госэнергоиздат, 1957.



УДК 621.182.001.5

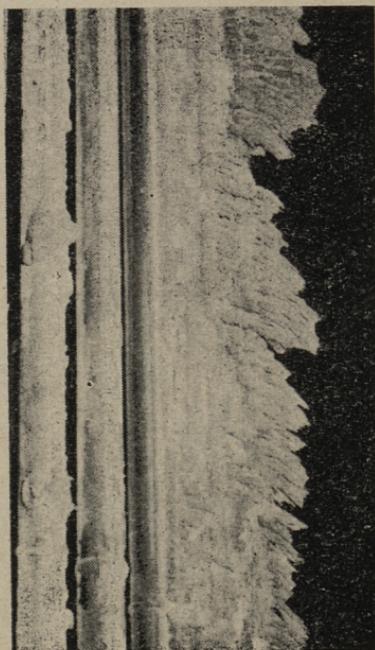
*Х. Х. Арпо, А. Я. Махлануу, А. Х. Рейер*

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ ПРИ СЖИГАНИИ ЭСТОНСКИХ СЛАНЦЕВ

В данной работе рассматриваются химический состав и структура золowych отложений эстонских сланцев, образовавшихся на трубах опытного ширмового пароперегревателя, установленного в газоходе котла ТП-17\*). Также приводятся некоторые данные об их минерологическом составе, полученные на основе термографического, оптического и рентгенографического анализа. Рассматриваются отложения, образование которых происходило как при работе, ширм с применением обдувки, так и при виброочистке.

### 1. Структура отложений

Отложения на трубах опытных ширм, как можно было ожидать [1], имели слоистый характер. Однако, явно трехслойную структуру имели отложения только на фронтальной (по ходу дымовых газов) части труб, где наблюдались длинные гребни отложений.



Фиг. 1. Отложения на трубах опытной ширмы

\*) См. статьи на стр. 13.

Тыльная сторона труб была покрыта плотными тонкими отложениями, где отдельные слои были трудно различимы.

Самый наружный и толстый слой темно-серого цвета имел место на фронтальной и частично на боковых сторонах труб, где местами образовывались гребни высотой до 20—30 см (фиг. 1). Прочность этого слоя была относительно небольшая.

Под верхним слоем находились промежуточный и нижний слои отложений с общей толщиной местами до 2—3-х миллиметров. Цвет этих слоев менялся от светлого до красноватого, а прочность была значительно больше прочности наружного слоя. Эти слои были хорошо связаны между собою и с металлом труб, так что самый нижний слой с трудом удалось отделить от металлической поверхности. Резкой границы между этими слоями в условиях наблюдения трудно было установить.

Нижние слои на боковых сторонах труб незаметно переходили на тонкое красноватое отложение, которое охватило тыльные стороны труб. Это явление особенно хорошо наблюдалось на последних, по ходу газов, трубах всех ширм. Отложение состояло из двух трудноразличимых тонких слоев и на нем

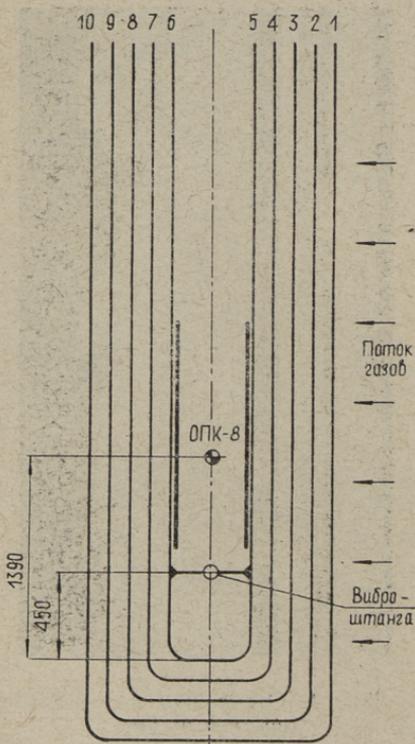
наблюдались местами светлые пятна и полоса неопределенной формы.

Заметной разницы в структуре отложений в зависимости от способа очистки и рабочей температуры стенок труб отдельных ширм при наружном осмотре не наблюдалось.

## 2. Обозначение и характеристика проб отложений

Пробы для лабораторных исследований были взяты с нижней части ширм, примерно на высоте обдувочного прибора (фиг. 2). При этом старались, насколько можно было, привести снятие проб по слоям отложений.

Обозначение и характеристика отдельных проб приведена в таблице 1. Ширмы пароперегревателя обозначаются по ходу пара (1-входная ширма). Обозначение труб ширмы приведено на фиг. 2.



Фиг. 2. Обозначение труб опытных ширм

## Обозначение и характеристика проб отложений

А. При обистке ширм обдувкой				Б. При виброочистке			
№ пробы	№ ширмы	№ трубы	Характеристика проб	№ пробы	№ ширмы	№ трубы	Характеристика проб
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	Наружный слой (гребни) фронтального отложения	21	1	1	Слой из-под гребнями фронтального отложения*
2	1	1	Нижние слои фронтального отложения	22	1	1	Промежуточный слой фронтального отложения
3	1	6	Наружный слой фронтального отложения	23	1	1	Нижний слой фронтального отложения
4	1	10	Верхний слой тонкого тыльного отложения	24	1	6	Гребни фронтального отложения
5	1	10	Нижний слой тонкого тыльного отложения	25	1	6	Слой из-под гребнями фронтального отложения
6	2	6	Темное отложение с накладки на трубе	26	1	6	Промежуточный слой фронтального отложения
7	2	1	Наружный слой фронтального отложения	27	1	6	Нижний слой фронтального отложения
8	2	1	Промежуточный слой фронтального отложения	28	1	10	Тыльное отложение (оба слои вместе)
9	2	1	Нижний слой фронтального отложения	29	2	1	Слой из-под гребнями фронтального отложения
10	2	6	Наружный слой фронтального отложения	30	2	1	Нижние слои фронтального отложения
11	2	6	Нижние слои фронтального отложения	31	2	6	Гребни фронтального отложения

\* Слой из-под гребнями относится к наружному слою отложений.

1	2	3	4	5	6	7	8
12	2	10	Тыльное отложение (с левой стороны трубы)	32	2	6	Слой из-под гребнями фронтального отложения
13	2	10	Тыльное отложение (с правой стороны трубы)	33	2	6	Промежуточный слой фронтального отложения
14	3	1	Наружный слой фронтального отложения	34	2	6	Нижний слой фронтального отложения
15	3	1	Промежуточный слой фронтального отложения	35	2	10	Тыльное отложение (оба слоя вместе)
16	3	1	Нижний слой фронтального отложения	36	3	1	Слой из-под гребнями фронтального отложения
17	3	6	Наружный слой фронтального отложения	37	3	1	Нижние слои фронтального отложения
18	3	6	Нижние слои фронтального отложения	38	3	6	Гребни фронтального отложения
19	3	10	Верхний слой тыльного отложения (с левой стороны трубы)	39	3	6	Слой из-под гребнями фронтального отложения
20	3	10	Нижний слой тыльного отложения (с левой стороны трубы)	40	3	6	Нижние слои фронтального отложения

### 3. Результаты химических анализов

Перед химическим анализом для всех проб определялась потеря при прокаливании, которая у большинства проб составляла 1,5—2,5%. Никаких заметных закономерностей здесь не наблюдалось. Особый интерес представляет только необычное для отложений летучей сланцевой золы явление, когда некоторые пробы тонких отложений с задних и боковых сторон труб (пробы 4; 12; 13; 20; 35) при прокаливании при 1000°C расплавились.

Общие результаты химических анализов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты химических анализов отложений

№ пробы	Содержание, в %								
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub> общ.	SO <sub>3</sub> сульф.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15.95	5.05	5.28	29.52	2.56	0.20	10.50	32.12	32.12
2	14.20	20.59	4.04	26.64	2.11	0.25	9.30	23.32	23.16
3	9.41	4.92	3.21	31.71	1.73	0.26	11.10	37.23	37.13
4	3.11	5.11	3.63	4.99	1.59	0.55	41.40	39.56	39.56
5	3.86	6.81	4.97	6.33	0.12	0.44	35.72	41.28	41.28
6	3.85	17.95	7.06	27.17	0.34	0.15	8.71	34.65	34.65
7	22.82	5.29	5.76	30.57	3.36	0.20	6.68	25.28	25.28
8	14.13	5.66	3.99	31.04	2.59	0.31	7.80	33.87	33.64
9	12.77	20.27	5.61	23.37	1.77	0.20	9.10	26.55	26.55
10	8.74	4.57	3.18	32.59	1.67	0.18	9.05	39.23	38.81
11	7.25	19.65	5.92	14.20	1.06	0.25	20.52	31.98	30.85
12	4.70	6.40	3.42	7.98	1.08	0.49	37.00	38.76	38.71
13	2.28	2.61	2.60	3.79	1.76	0.65	45.00	41.40	41.40
14	24.16	4.92	6.19	29.76	3.04	0.14	5.95	25.70	25.70
15	16.98	4.47	4.66	31.86	2.32	0.21	6.60	32.05	32.05
16	14.10	6.37	3.95	31.36	2.14	0.13	6.70	34.20	34.20
17	8.56	5.00	2.60	34.14	1.63	0.20	7.40	39.18	38.60
18	10.62	18.45	4.11	20.18	1.64	0.19	12.90	30.13	30.03
19	11.64	3.01	3.57	26.52	1.47	0.24	14.50	37.60	37.60
20	6.06	4.63	3.04	8.99	0.91	0.35	33.80	41.30	40.88
21	15.46	5.08	4.16	30.10	1.88	0.12	8.91	33.35	33.35
22	14.90	9.52	3.26	30.21	2.45	0.12	7.80	30.70	30.47
23	12.57	26.44	3.32	21.23	1.60	0.21	9.77	26.18	25.95
24	23.55	5.32	6.09	33.83	3.29	0.13	6.27	22.31	22.30
25	17.55	4.58	4.88	33.27	2.14	0.12	5.46	31.51	31.31
26	14.03	6.03	3.11	31.98	2.21	0.21	7.90	33.74	33.74
27	12.03	25.01	4.66	22.34	1.87	0.23	10.87	23.96	23.72

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
28	8.09	3.19	4.80	11.89	1.57	0.37	25.15	37.33	37.33
29	15.87	5.81	3.95	32.46	2.36	0.10	6.90	31.98	31.98
30	12.78	25.29	4.28	20.75	1.75	0.17	10.56	25.60	25.43
31	31.76	6.23	7.60	35.05	3.31	0.11	3.54	12.94	12.78
32	11.86	6.55	7.11	35.34	3.91	0.10	6.27	29.54	29.18
33	15.11	6.44	3.49	31.47	2.43	0.13	7.91	32.96	32.21
34	9.07	33.11	3.28	18.74	1.44	0.24	11.10	23.43	23.40
35	11.73	4.61	5.28	16.58	1.68	0.31	19.17	35.80	35.80
36	16.04	5.08	4.25	31.07	1.61	0.13	8.25	33.59	33.26
37	13.96	13.40	4.40	27.12	1.96	0.15	8.71	31.05	31.00
38	25.97	5.02	6.08	31.31	3.09	0.13	5.89	22.43	22.43
39	16.42	4.64	4.20	33.24	2.56	0.13	7.70	30.75	30.75
40	14.38	13.51	4.53	26.16	1.93	0.15	7.62	30.90	30.90

Для характеристики отдельных слоев и проб отложений, а также для выяснения значения разных компонентов летучей золы при образовании отложений, необходимо рассмотреть распределение отдельных химических компонентов в пробах. Для лучшего обзора ниже эти данные приводятся по компонентам.

Содержание  $SiO_2$  в пробах колеблется в пределах от 2,28 до 31,76%. При этом наблюдается уменьшение содержания  $SiO_2$  в нижних слоях отложений. Особенно незначительно содержание  $SiO_2$  пробы с тыльных сторон труб (4; 5; 12; 13), образование которых произошло при очистке ширм обдувкой. Интересно отметить, что отложения, подвергающиеся воздействию обдувки, содержат в общем меньше  $SiO_2$ , чем соответствующие отложения при виброочистке.

Содержание  $Fe_2O_3$  в пробах колеблется от 2,61 до 33,11%. Если верхние слои отложений содержат  $Fe_2O_3$  в среднем 5—6%, то в нижних слоях содержание  $Fe_2O_3$  резко повышается и достигает 20—30%. Исключение представляют лишь тонкие отложения с тыльной стороны труб, где содержание  $Fe_2O_3$  не превышает 6,81%, а в некоторых пробах является даже ниже среднего содержания в наружных слоях отложений.

Здесь надо отметить, что уменьшение содержания  $Fe_2O_3$  в пробах тыльных отложений не соответствует уменьшению содержания таких инертных компонентов как например  $SiO_2$ . Если в наружных слоях отложений соотношение  $SiO_2/Fe_2O_3$  в среднем колеблется от 1,7 до 4,9% при очистке ширм обдувкой и от 2,7 до 5,1% при виброочистке, то в тыльных отложениях эти соотношения соответственно составляют 0,6—1,3% (за исключением пробы № 19) и 2,5%. В нижних слоях фронтальных отложений соотношение  $SiO_2/Fe_2O_3$  колеблется от 0,3 до 2,2%.

Характер изменения содержания  $Al_2O_3$  и  $MgO$  в пробах неопределенный, что не позволяет говорить здесь о каких-либо закономерностях.

$CaO$  является одним из основных компонентов отложений, так как ее содержание в пробах в среднем, кроме самых нижних слоев, превышает 30% и даже в нижних слоях достигает в большинстве случаев величину более 20%. Исключение представляют здесь опять отложения с тыльных сторон труб, где содержание  $CaO$  составляет при обдувке в среднем 4—9% и при виброочистке не более 17%.

Особое значение при загрязнении и коррозии поверхностей нагрева имеют по литературным данным щелочные металлы [1, 2, 3, 4], определение которых проводилось с помощью пламенного фотометра.

Содержание  $Na_2O$  в отложениях в среднем не превышает 0,2—0,3%, за исключением проб с тыльных сторон труб, которые содержат  $Na_2O$  от 0,24 до 0,65%. Что касается изменения содержания  $Na_2O$  в отдельных слоях отложений, то по данным химических анализов пока трудно что-нибудь определенное сказать.

Содержание  $K_2O$  изменяется в пробах в очень широких пределах, от 3,54 до 45,0%. На поверхностях нагрева котлоагрегатов, работающих на эстонских сланцах, еще никогда не наблюдались отложения с таким высоким содержанием  $K_2O$ . Если в пробах с фронтальной части труб, кроме некоторых нижних слоев, содержание  $K_2O$  в среднем было 6—10%, несколько увеличиваясь в нижних слоях, то в отложениях с задних сторон труб при обдувке содержание  $K_2O$  составляет в среднем 30—45% и при виброочистке более 20%. Надо также отметить, что в фронтальных отложениях, подвергающихся прямому воздействию обдувочного прибора (труба № 6), содержание  $K_2O$  в среднем немного превышает содержания  $K_2O$  в остальных фронтальных отложениях.

Все пробы без исключения содержат значительное количество сульфатной  $SO_3$ . Некоторое уменьшение содержания  $SO_3$  в нижних слоях фронтальных отложений, повидимому, вызвано увеличением количества  $Fe_2O_3$  в этих пробах. Особое место занимают и здесь пробы тонких отложений с тыльной стороны труб, где содержание  $SO_3$  значительно превышает содержания  $SO_3$  в остальных пробах соответствующих ширм. В некоторых пробах наблюдается разница между количеством сульфатной  $SO_3$  и общей серой, выраженной в виде  $SO_3$ . Качественное исследование этих проб показало, что в этих пробах имеются следы сульфидной серы. Количественно содержание сульфидной серы не определялось. Судя по дан-

ным химических анализов, наличие сульфидной серы в пробах носит неопределенный характер.

Кроме вышеупомянутых компонентов в пробах нижних слоев и тыльных отложений было обнаружено заметное количество *Pb*. Качественное определение *Pb* проводилось путем спектрального анализа. Однако, судя по интенсивности спектральных линий и обстоятельством, что *Pb* некоторым химическим определениям мешал, говорить о наличии *Pb* только «в следах» нельзя. Причины накопления *Pb* в этих слоях пока не известны.

На основе химических анализов можно сделать вывод, что значительную часть отложений составляют разные сульфатные соединения  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  и  $Al_2O_3$ . Образование сульфатов железа мало вероятно из-за низкой температуры разложения их. Однако значение и количество сульфатных соединений в отложениях с разных сторон труб, а также в разных слоях отложений не одинаково. Для лучшего представления в табл. 3 приведены расчетные данные о необходимом для полного образования сульфатов  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  и  $K_2O$  количеством  $SO_3$  и действительным количеством  $SO_3$  в пробах. Нехватка  $SO_3$  во всех пробах свидетельствует о том, что значительная часть вышеупомянутых окислов должна находиться в составе разных силикатных минералов, в соединениях подобно  $CaO \cdot Al_2O_3$   $CaO \cdot Al_2O_3$  и т. д., или в свободном виде.

Таблица 3

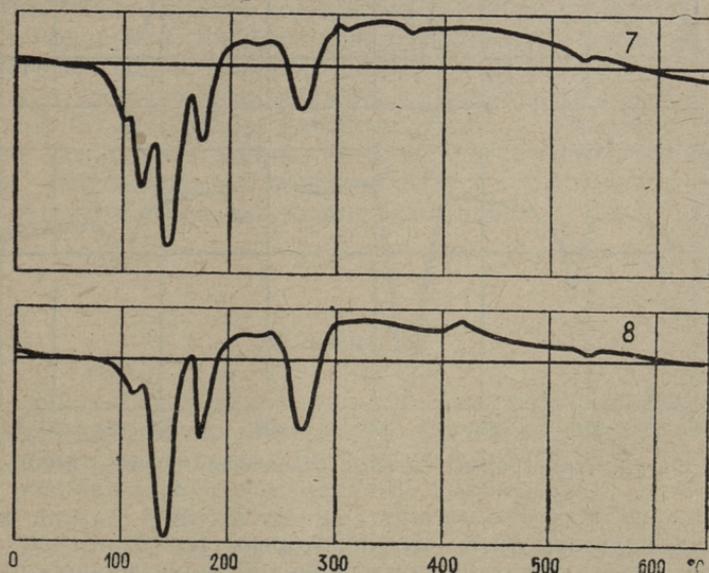
Нужное для образования *Ca*, *Mg*, *Al*, *Na*, и *K* сульфатов количество  $SO_3$  и действительное количество  $SO_3$  в пробах

№№ пп	Слой отложений	Нужное кол-во $SO_3$ , %	Действи- тельное кол-во $SO_3$ , %	Разница, %
А. При обдувке				
1.	Наружные слои . . . . .	64—70	25—39	26—45
2.	Промежуточные слои . . . . .	65—67	32—34	32—35
3.	Нижние слои . . . . .	53—64	23—34	23—37
4.	Тыльные отложения . . . . .	52—62	37—41	10—24
Б. При виброочистке . . . . .				
1.	Наружные слои . . . . .	64—81	12—33	30—65
2.	Промежуточные слои . . . . .	62—65	30—34	30—33
3.	Нижние слои . . . . .	47—61	23—31	23—32
4.	Тыльные отложения . . . . .	53—56	35—37	15—20

По данным табл. 3 видно, что в наружных слоях отложений относительно количество сульфатных соединений в среднем немного уменьшается (нехватка  $SO_3$  увеличивается). Это повидимому является причиной их меньшей прочности. Надо также отметить, что наружные слои отложений при виброочистке содержат больше инертного несульфатного вещества, чем соответствующие слои при обдувке. В остальных слоях особенной разницы в этом отношении не наблюдается. Что касается тыльных отложений, то здесь несомненно основными составляющими являются разные сульфатные соединения.

#### 4. Результаты термографического, оптического и рентгенографического анализов

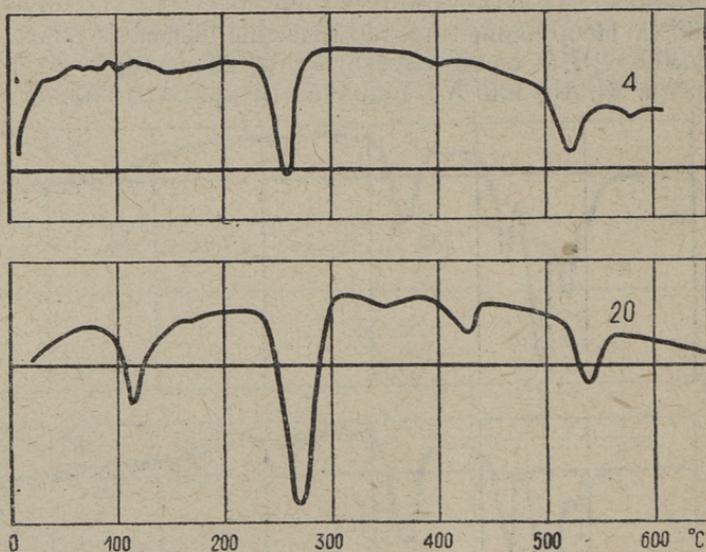
Термографический анализ предварительно обработанных водой проб отложений с фронтальной части труб показывает наличие в пробах  $CaSO_4$  и  $K_2SO_4$ . На фиг. 3 приведены типичные термограммы фронтальных отложений, где хорошо выражены эндотермические эффекты дегидратации  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  при  $125-150^\circ C$  и  $175-180^\circ C$  и сингенита ( $CaSO_4 \cdot K_2O_4 \cdot H_2O$ ) при  $265^\circ C$ . Небольшие эндотермические эффекты возле эффектов  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  свидетельствуют о наличии в отложениях сульфатов  $Al$ ,  $Mg$  или  $Na$ . Однако эти эффекты сильно мешают



Фиг. 3. Термограммы фронтальных отложений (пробы 7 и 8)

точному определению величины эффектов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и тем самым не позволяют рассчитывать [1] количественное содержание  $\text{CaSO}_4$  в пробах по данным термографического анализа.

Совершенно иная картина наблюдается при рассмотрении термограмм проб с тыльной стороны труб (фиг. 4). По данным химических анализов, основное место в этих отложениях занимает  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Это предположение подтверждается термографическим анализом. На термограммах наблюдается значительный эффект сингенита при 260—270°C и небольшой эндотермический эффект разложения сингенита на сульфаты  $\text{Ca}$  и  $\text{K}$  при 400—430°C. Эффекты  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  или отсутствуют совсем, или являются незначительными. Это не позволяет определить количество  $\text{K}_2\text{SO}_4$  в отложениях по эффекту сингенита, так как  $\text{K}_2\text{SO}_4$  из-за недостатка  $\text{CaSO}_4$  по-видимому не полностью находится в составе  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . На термограммах также хорошо виден эндотермический эффект около 500—550°C, что соответствует дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и свидетельствует о наличии свободной  $\text{CaO}$  в пробах. На термограммах фронтальных отложений этот эффект почти не наблюдается.



Фиг. 4. Термограммы тыльных отложений (пробы 4 и 20)

Интересно отметить, что некоторые термограммы самых нижних слоев фронтальных отложений показывают, что эти слои по минералогическому составу являются переходными между фронтальными и тыльными отложениями.

Оптические исследования проб тыльных отложений показали, что они состоят из очень мелких частиц, среди которых находятся отдельные более крупные частицы. Основной составляющей этих отложений является аморфное, оптически изотропное вещество. Показатель преломления основной массы, определенной иммерсионным методом, колеблется в пределах от 1,498 до 1,526. Если сравнить эти данные с данными чистых  $K_2SO$  и  $CaSO_4$  (соответственно  $N_g = 1,4973$ ,  $N_m = 1,4947$ ,  $N_p = 1,4935$  и  $N_g = 1,614$ ,  $N_m = 1,576$  и  $N_p = 1,570$ ), то можно предположить, что основная масса отложений состоит из смеси сульфатов  $K$  и  $Ca$ , которые находятся в очень мелком аморфном состоянии. Ввиду отсутствия данных о состоянии арканита ( $K_2SO_4$ ) и двойных сульфатов  $K$  и  $Ca$  в разных физико-химических условиях, сказать что-нибудь определенное о минералогическом составе основной массы пока нельзя. Интересно отметить, что определить более крупные кристаллы  $CaSO_4$ , которые всегда наблюдались в пробах отложений, здесь не удалось. Среди более крупных частиц были обнаружены кристаллы  $Ca(OH)_2$ , что подтверждает наличие свободной  $CaO$  в пробах.

Очень мелкую аморфную структуру тыльных отложений подтверждает также рентгеноструктурный анализ, так как на рентгенограммах наблюдается сильная вуаль. Применение трубки с железным антикатодом позволило вуаль несколько уменьшить. Из-за малого количества справочных данных о минералах подобного происхождения, полностью расшифровать рентгенограмм еще не удалось. На основе предварительных данных можно предположить наличие в отложениях кроме  $CaSO_4$  гроссуляра  $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$ , магнетита  $Fe_3O_4$  и магнезиоферрита  $MgFe_2O_4$ . Однако эти данные требуют еще уточнения. Обнаружить на рентгенограммах линии  $K_2SO_4$  не удалось, что свидетельствует о аморфном состоянии последнего.

### Заключение

Отложения, образовавшиеся на ширмах опытного пароперегревателя, значительно отличаются по своему химическому и минералогическому составу на разных сторонах труб, в то время как разница между отложениями в зависимости от способа очистки ширм и рабочей температуры стенок труб меньше выражается. Особый интерес представляет отличие самых нижних слоев отложений фронтальной и тыльной частей труб. Наличие значительного количества  $Fe_2O_3$  в пробах нижних слоев фронтальных отложений показывает, что они влияют коррозионно на

металл труб, в то время как тыльные отложения заметного коррозионного влияния не оказывают.

На основе многих исследований известен до сих пор факт, что с увеличением содержания щелочей в сульфатных отложениях золы коррозионное влияние последних на поверхности нагрева увеличивается, особенно при присутствии сульфата  $Al$ , так как двойные сульфаты  $Na_3Al(SO_4)_3$  и  $KAl(SO_4)_2$  значительно ускоряют коррозию стали. По-видимому  $Al_2O_3$  в этих тыльных отложениях находится в составе разных силикатов.

Образование отложений с высоким содержанием сульфатов щелочей с низкой температурой плавления на тыльных сторонах труб показывает, что в некоторых случаях увеличение содержания щелочей в отложениях не сопровождается заметным увеличением коррозионной активности отложений. Уменьшение соотношения  $SiO_2/Fe_2O_3$  в этих отложениях свидетельствует однако о селективном увеличении содержания  $Fe_2O_3$  в тыльных отложениях и предупреждает, что в благополучных условиях возможность коррозии не исключена.

Образование своеобразных тонких отложений на тыльных сторонах труб происходит, как можно предполагать, за счет образовавшихся в топочных процессах при разложении разных силикатов (ортоклаза, гидрослюд) очень мелких частиц, состоящих в основном из сульфатов щелочных металлов. Эти частицы по-видимому уносятся потоком газа настолько безинерционно, что могут попасть вместе с газом в непосредственную близость тыльных поверхностей труб, где осаждаются и образуют отложения. Этим можно объяснить необыкновенно высокое содержание  $K_2SO_4$  в этих отложениях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. П. Эпик. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. Эгиз, Таллин, 1961.
2. W. Gumz, H. Kirch, M. Th. Mackowsky. Schlackenkunde. Springer-Verlag, 1958.
3. A. Rahmel. Beitrag zur Frage des Zundverhaltens von Kesselbaustählen. «Mitt. VGB» 1961, Heft 74.
4. W. Nelson, C. Cain. Corrosion of Superheaters and Reheaters of Pulverized-Coal Fired Boilers. Paper ASME, 1959, № A-89-8. Trans. ASME, Series A, July, 1960.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. И. П. Эпик, А. А. Отс, В. И. Резник. О методике исследования теплообмена в поверхностях нагрева котельных агрегатов с помощью $\alpha$ -калориметров .....	3
2. А. А. Отс, В. И. Резник. Исследование теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах при использовании паровой обдувки .....	13
3. А. А. Отс, В. И. Резник. Исследование теплообмена в поперечно-обтекаемых ширмах при использовании виброочистки .....	33
4. А. А. Отс, В. И. Резник. Некоторые рекомендации по проектированию поперечно-обтекаемых ширм для сланцевых котлов .....	45
5. Х. Х. Арро, А. Я. Махлапуу, А. Х. Рейер. Физико-химическая характеристика отложений на поперечно-обтекаемых ширмах пароперегревателя при сжигании эстонских сланцев .....	51



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА И ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
В ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШИРМАХ

Сборник статей

Таллинский политехнический институт

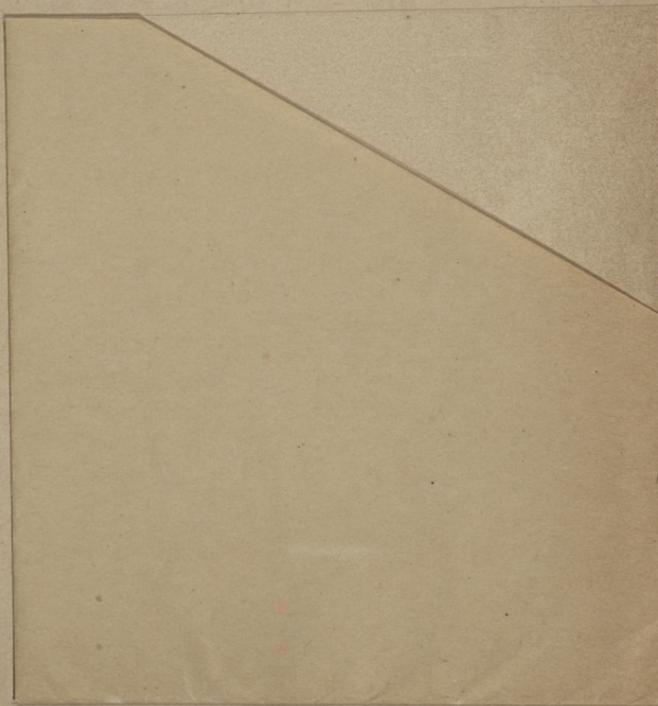
Редактор А. Отс

Технический редактор Я. Мыттус

Сдано в набор 19 VIII 1963. Подписано к печати  
14 XII 1963. Бумага 60×90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печатных листов 4.0.  
Учетно-издательских листов 3.25. Тираж 600 экз.  
МВ-10 714. Заказ № 4264.

Типография «Пунане Тяхт», Таллин, ул. Пикк 54/58.

Цена 23 коп.



Цена 23 коп.