

В. СЕЛЪГ

## ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ГАЗОВОЙ СТОРОНЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

Анализируется взаимоотношение между факторами, влияющими на тепловосприятие при образовании различных видов отложений на поверхности зонда — топочного калориметра [1], находящегося в пылесланцевой топке котлоагрегата БКЗ-75-39 Фел.

Основными факторами, от которых зависят ход и характер загрязнения поверхностей нагрева в топке, являются: падающий на поверхность лучистый поток  $q_n$ ; температура тепловоспринимающей (загрязненной) поверхности  $t_n$ ; избыток воздуха  $\alpha_T$  и аэродинамические условия. В проведенных опытах изучалось влияние первых двух факторов. Для предотвращения интенсивного улетучивания соединений калия в восстановительной среде [2], что могло бы вызывать искажение хода процесса загрязнения, на выходе из топки поддерживался коэффициент избытка воздуха  $\alpha_T \geq 1,2$ .

Во время опытов топочные калориметры были расположены на разных высотах топочной камеры в специально подготовленных гляделках. Падающие тепловые потоки  $q_n$  измеряли периодически радиометрами [3] в этих же гляделках. Охлаждение топочных калориметров производили сжатым воздухом с полуавтоматической регулировкой расхода.

Работающий по принципу теплопроводности топочный калориметр воспринимает следующее количество тепла:

$$q_{\text{в}} = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta'} \cdot \Delta t' = \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta''} \cdot \Delta t'' \quad (1)$$

Здесь  $\lambda_{\text{ст}}$  — коэффициент теплопроводности металла, определяемый по температуре стенки измерительного элемента  $t_{\text{ст}}$  (в точке А на рис. 1);

$\delta'$  — расстояние между изотермами  $t_3$  и  $t_2$ ;

$\delta''$  — расстояние между изотермами  $t_1$  и  $t_2$ ;

$\Delta t'$  — перепад температур,  $\Delta t' = t_3 - t_2$ ;

$\Delta t''$  — перепад температур,  $\Delta t'' = t_1 - t_2$ .

Считая в первом приближении  $\lambda_{\text{ст}} = \text{const}$ , из уравнения (1) получим  $\delta'/\delta'' = \Delta t'/\Delta t''$ . Можно доказать, что при симметричном расположении термопар (рис. 1) угол наклона изотерм  $\vartheta$  выражается уравнением \*

\* Формулы (2) и (3) выведены совместно с Т. Пиркером.

$$\vartheta = \arctg \frac{\delta \left( \frac{\Delta t'}{\Delta t''} - 1 \right)}{\frac{\Delta t'}{\Delta t''} + 1}, \quad (2)$$

где  $\delta$  и  $k$  — геометрические величины (рис. 1).

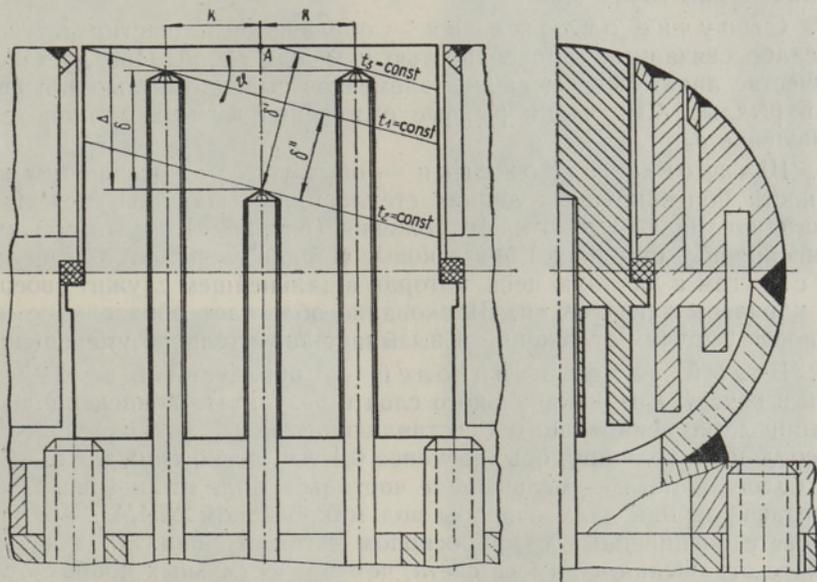


Рис. 1. Измерительный элемент в зонд-калориметре.

Вследствие предполагаемой параллельности изотерм

$$\delta' = \delta \cdot \cos \vartheta + k \cdot \sin \vartheta. \quad (3)$$

Коэффициент  $\lambda_{ст}$  определяли согласно [4] по формуле

$$\lambda_{ст} = 3,105(635 - t_{ст}) \cdot 10^{-2} + 33,4 \text{ вт/м} \cdot \text{град}. \quad (4)$$

Здесь

$$t_{ст} = t_2 + \frac{\Delta}{\delta} \left( \frac{t_1 + t_3}{2} - t_2 \right). \quad (5)$$

Для проверки надежности выбранной методики были поставлены специальные опыты с целью установления эффективных коэффициентов поглощения рабочих поверхностей теплоприемников — радиометров и калориметров. Эталонном служил водяной калориметр [3], рабочая поверхность которого была покрыта смесью графита с жидким стеклом. Для такой поверхности был принят коэффициент поглощения  $a_{покр} = 0,96$ . Полученные средние эффективные коэффициенты поглощения  $a_p = 0,744 \pm \pm 1,3\%$  для двух одинаковых радиометров и  $a_k = 0,82 \pm 7,5\%$  для девяти окисленных в электропечи измерительных элементов показывают, что выбранный метод расчета  $q_n$  и  $q_v$  достаточно надежен, так как эти коэффициенты хорошо согласуются с данными о степени черноты окисленных углеродистых сталей [5].

В зависимости от места расположения  $q_n$  и  $t_{ст}$ , на поверхности зонда образовывались различного рода отложения. По внешним признакам и

влиянию на  $q_v$  их можно разделить по меньшей мере на пять следующих групп.

1. Подслой — первоначальный слой темного цвета (рис. 2а), образуется в нижней части топки и улучшает тепловосприятие чистого калориметра. Со временем подслоя посредством окисей тесно связывается с поверхностью. Большинство частичек подслоя имеет вид шариков диаметром менее 0,02 мм.

2. Сыпучие отложения — образуются из частиц летучей золы, слабо связанных с поверхностью и между собой. При достаточном количестве липких связывающих элементов сыпучие отложения переходят в рыхлые. Сыпучие и рыхлые отложения вызывают значительное уменьшение  $q_v$ .

3. Шлаковые отложения — образуются из оседающих на поверхности более крупных липких стекловидных шариков, между которыми накапливаются сыпучие отложения (рис. 2б, в). Часто образуются башнеобразные строения, где шлаковые шарики сцепляются (спекаются) друг с другом в длинную цепь, которая в дальнейшем служит своеобразным каркасом загрязнения. Шлакование облегчает образование на поверхности сыпучих отложений и вызывает значительное уменьшение  $q_v$ .

4. Белый налет аэрозолей — образуется в верхней части топки в качестве первоначального слоя в результате конденсации и сублимации легко испаряющихся составляющих золы. Этот налет, несмотря на небольшую толщину, обычно менее 0,1 мм, резко снижает  $q_v$ . Структура белого налета — мельчайшие частицы в виде пыли (рис. 2г). При фотографировании данной пробы под микроскопом МИМ-7 в отраженном свете соединенный с микроскопом фотометр показал значительно большее отражение видимого света, чем при остальных пробах отложений. Можно предполагать, что в инфракрасной области спектра белый налет аэрозолей также имеет более низкую поглощательную способность. Его поверхность значительно менее шероховата, чем поверхность подслоя.

5. Связанные отложения — светло-коричневые, часто с желтым или розовым оттенком сульфатного характера. Вначале частицы сцепляются друг с другом, образуя вокруг поверхности нагрева своеобразную корку, которая со временем связывается с поверхностью металла посредством окисей, проникающих иногда сквозь слой отложения (рис. 2д). Этот вид отложений может тоже иметь башнеобразные строения, но с более мелкой структурой (рис. 2е), растущие против течения топочных газов.

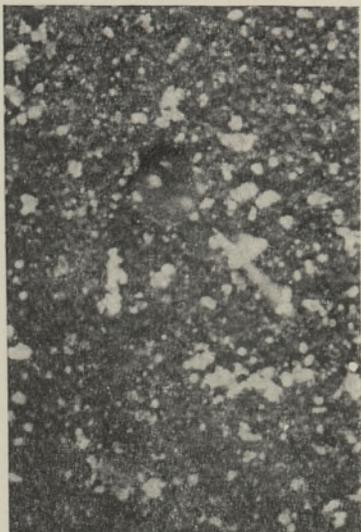
Разумеется, что несколько указанных выше разновидностей отложений могут встречаться одновременно в довольно сложных взаимоотношениях, имея в комплексе уже качественно новые свойства (например, образование связанно-шлакового отложения). Также нельзя различать все разновидности отложений только по их внешнему виду. В данном случае теплофизические свойства отложений рассматривались независимо от их химического состава.

Тепловосприятие топочного калориметра удобно выразить в безразмерном виде посредством коэффициента тепловой эффективности [6]:

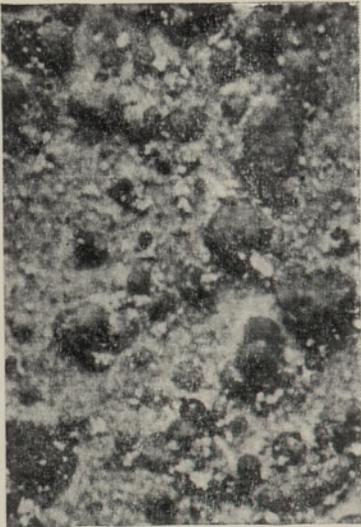
$$\psi_k = \frac{q_n}{q_n^0}$$

На рис. 3 и 4 приведены некоторые характерные кривые изменений коэффициента тепловой эффективности  $\psi_k$  во времени  $\tau$ . Средние данные о режимах опытов приведены в таблице.

а



б



в



г



д



е



Рис. 2. Отраженный свет. е — с увеличением в 25 раз, остальные — в 50 раз.



Характеристика результатов опытов

Номер рисунка	Номер опыта	$q_n$ , кВт/м <sup>2</sup>	$t_{ст}$ , °C	Вид отложения
3	1	242	338	Подслой + башнеобразные строения
	2	256	402	Серый подслой
	3	340	355	Подслой + башнеобразные строения с сыпучими отложениями
	4	337	411	Подслой + связанные отложения
4	5	119	363	Белый налет аэрозолей
	6	118	464	Гладкий слой связанных отложений
	7	168	380	Связанные отложения

Опыты 4 (рис. 3) и 7 (рис. 4) проводились с измерительными элементами, оксидированными в электропечи при температуре 400°С в течение 5 ч. Перед остальными опытами поверхность измерительного элемента очищалась шкуркой до металлического блеска. Все кривые на рис. 3 получены в опытах на уровне горелок, а на рис. 4 — в верхней части топки (отм. 17 200 [1]).

Из анализа опытных данных, приведенных в таблице и на рис. 3 и 4, вытекают некоторые закономерности процесса загрязнения.

1. Уже в начальный период опыта  $\psi_k$  определяется поглощательной способностью оседающих отложений. В опытах, проведенных на уровне горелок (рис. 3), достаточно нескольких минут, чтобы покрыть поверхность отложениями настолько, что очищенная до металлического блеска поверхность имела бы более высокое  $\psi_k$ , чем оксидированная (кривая 4). Только при минимальных  $q_n$  и  $t_{ст}$  (кривая 1)  $\psi_k$  продолжает увеличиваться в течение 1,5 часа в результате окисления и повышения шероховатости при оседании золowych частиц.

В верхней части топки (рис. 4), где процесс загрязнения проходит медленнее, превращение поверхности затягивается на несколько часов. В течение этого времени  $\psi_k$  очищенных поверхностей повышается (кривые 5 и 6), а оксидированной поверхности уменьшается (кривая 7) и все кривые достигают примерно одинаковой величины  $\psi_k = 0,5 \div 0,6$ . Есть основание утверждать, что к этому времени все три поверхности будут покрыты белым налетом аэрозолей.

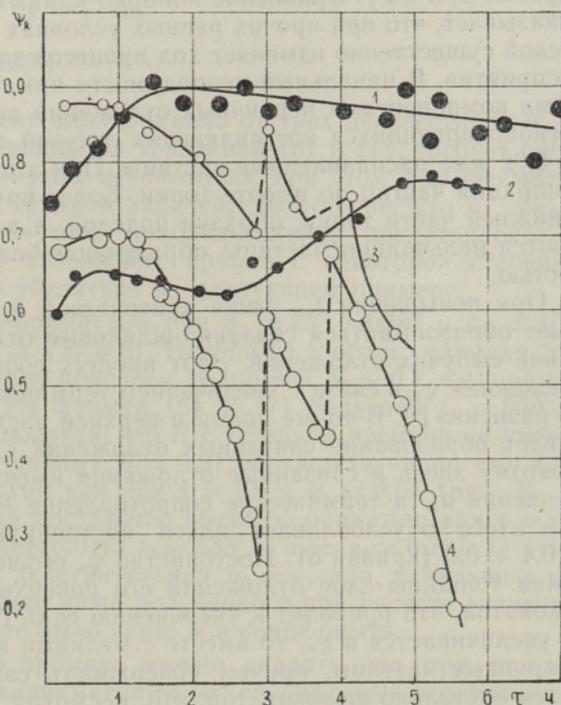


Рис. 3. Зависимость относительного тепловосприятя в нижней части топки от времени.

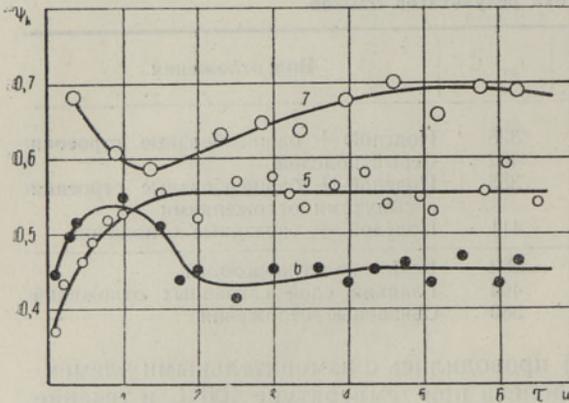


Рис. 4. Зависимость относительного тепловосприимчивости в верхней части топки от времени.

в таком случае процесс загрязнения продолжался бы с образованием связанных отложений, как и при опытах с более высокой  $t_{ст}$  (кривые 6 и 7).

2. Если средняя  $t_{ст}$  меньше определенной (в зависимости от  $q_n$ ) критической величины [1], то процесс загрязнения проходит неинтенсивно (кривые 1, 5 и 7). Сравнение попарно кривых 1 и 2, 5 и 6, а также 3 и 4 показывает, что при прочих равных условиях повышение  $t_{ст}$  выше критической существенно изменяет ход процесса загрязнения и уровень тепловосприимчивости. В начальный период опыта при  $t_{ст}$  ниже критической основными компонентами первичных отложений являются продукты возгонки легкоиспаряющихся составляющих летучей золы и мелкие (диаметром до 0,02 мм) расплавленные частицы. При этом происходит своеобразная сепарация частиц по высоте топки. Более крупные частицы осаждаются в нижней части топки, образуя подслои, а в верхней части ее сублимируются мельчайшие частицы, образующие белый налет с гладкой поверхностью.

При повышении  $t_{ст}$  выше критической в нижней части топки начинают образовываться связанно-шлаковые отложения и происходит оседание сыпучих отложений. Этот процесс сопровождается значительным снижением  $\psi_k$  в связи с увеличением термического сопротивления  $R$  слоя загрязнения [8]. В то же время в верхней части топки повышение  $t_{ст}$  вызывает образование связанных отложений с более мелкой структурой. Поэтому здесь и связанные отложения имеют низкий коэффициент поглощения  $a_3$ , а термическое сопротивление  $R$  повышается, что в конечном итоге обуславливает почти постоянную низкую величину  $\psi_k = 0,4 \div 0,5$  (кривая 6). Постоянство  $\psi_k$  объясняется тем, что при увеличении толщины слоя отложений его поверхность становится более шероховатой, что приводит к увеличению ее  $a_3$  [9]. Если же одновременно с  $t_{ст}$  увеличивается и  $q_n$ , то вместе с мелкими на поверхности осаждаются и крупные частицы, причем поверхность связанных отложений становится настолько шероховатой, что, несмотря на рост  $R$ , его  $\psi_k$  в течение многих часов продолжает расти до  $\psi_k \sim 0,7$  (кривая 7) и затем начинает падать.

3. Скачкообразное изменение  $\psi_k$  (кривые 3 и 4) обусловлено образованием башнеобразных строений, с которыми вначале связываются сыпучие отложения, что приводит к повышению  $R$  и  $t_n$  и в дальнейшем

и что низкое  $\psi_k$  вызвано низкой поглощательной способностью  $a_3$  белого налета. При низких  $q_n$  и  $t_{ст}$  условия для оседания других видов отложений неблагоприятны и  $\psi_k$  поверхности, покрытой одним белым налетом, длительное время удерживается на низком уровне:  $\psi_k = 0,5 \div 0,6$  (кривая 5). Объяснить столь низкое значение  $\psi_k$  при отложении толщиной 0,1 мм только низким коэффициентом теплопроводности  $\lambda_3$  [7] нельзя, потому что

к образованию связанных (и рыхлых) отложений. По разным причинам (легкий стук по корпусу калориметра и т. д.) эти отложения рассыпаются, вызывая периодически резкий подъем  $\psi_k$ .

4. Общая картина загрязнения топки такова, что  $\psi_k$  в нижней части топки изменяется в широких пределах — от 0,9 до 0,2 и ниже, а в верхней части топки изменения  $\psi_k$  незначительны и происходят медленно. При чистых же поверхностях нагрева (в начале опыта) абсолютная величина  $\psi_k$  в верхней части топки всегда меньше, чем в нижней. Тенденция снижения коэффициента тепловой эффективности по высоте топки была обнаружена также в работах ЦКТИ [6, 10].

Из сказанного следует, что ход процесса загрязнения во многом зависит от температуры на наружной поверхности отложения  $t_n$ . От нее зависит не только собственное излучение покрытой отложением поверхности, но и дальнейшее развитие процесса загрязнения на ней, в ходе которого изменяются как  $a_3$  и степень черноты  $\epsilon_3$  поверхности отложения, так и  $t_n$ , что в конечном счете ведет к прогрессирующему загрязнению.

Величину  $t_n$  можно выразить формулой

$$t_n = R \cdot \psi \cdot q_n + t_{ст} \quad (6)$$

или получить из теплового баланса на поверхности отложения:

$$t_n = \sqrt[4]{\frac{(a_3 - \psi_n) \cdot q_n}{\epsilon_3 \cdot \sigma_0}} - 273, \quad (7)$$

где  $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$  вт/(м<sup>2</sup> · град<sup>4</sup>).

Таким образом  $t_n$  зависит одновременно от трех неизвестных:  $R$ ,  $a_3$  и  $\epsilon_3$ . Решение системы, состоящей из уравнений (6) и (7), требует определения двух из трех упомянутых неизвестных, при этом в зависимости от  $t_n$ , что является крайне трудной задачей. Допущение, что  $a_3 = \epsilon_3 = \text{const}$  [7, 11], позволяет получить приблизительное представление о теплофизических свойствах отложений, правда с некоторой степенью субъективности, как можно убедиться на следующем примере.

В опыте с топочным калориметром при  $q_n = 256$  квт/м<sup>2</sup> и  $t_{ст} = 402^\circ$   $\psi_k = 0,76$  (кривая 2 на рис. 3,  $\tau = 6$  ч). Исходя из этого и учитывая, что калориметр был покрыт серым подслоем толщиной  $\delta_3 \sim 0,1$  мм, примем согласно [8]  $a_3 = \epsilon_3 = 0,85$ . Из формул (6) и (7) получаем  $t_n = 560^\circ$  и  $R = 0,81$  град · м<sup>2</sup>/квт. Предполагая, что  $R$  с течением времени не уменьшается, вычислим по полученному  $R = 0,81$  соответствующие ему  $t_n$  и  $a_3 = \epsilon_3$  для начала опыта. Так как при  $\tau = 1,5$  ч  $\psi_k = 0,64$  (рис. 3), то получается, что, несмотря на достаточно высокую принятую для  $\tau = 6$  ч  $a_3 = 0,85$ , в начальный период опыта  $t_n = 535^\circ$  и  $a_3 = \epsilon_3 = 0,707$ . Отсюда можно сделать вывод, что действительная  $a_3 = \epsilon_3$  для начального периода опыта должна быть еще ниже полученного при расчете значения, так как за основу при расчете было взято  $R$  в конце опыта.

На основе приведенного примера можно сказать, что при кратковременных опытах с зонд-калориметрами без специальных исследований  $a_3$  и  $\epsilon_3$  трудно получить достоверные данные для  $R$  и  $\lambda_3$ .

При более продолжительных опытах (а также для экранных поверхностей интенсивно загрязняющейся топки), когда поверхность отложения уже сформировалась, можно использовать определенные в лабораторных условиях зависимости  $\epsilon_3 = f(t_n)$ , например [12]. В топках, где

загрязнение происходит медленно, например при сжигании природного газа, следует учитывать возможность того, что покрывающая гладко-грубые экраны мелкодисперсная минеральная пыль [6] может иметь такую же низкую поглощательную способность, как и белый налет аэрозолей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сельг В. А., Тр. Таллинск. политехн. ин-та, Сер. А, № 240, 55 (1966).
2. Эпик И. П., Тааль Х. П., Изв. вузов. Энергетика, № 6, 70 (1964).
3. Эпик И., Отс А., Изв. АН ЭССР, Сер. техн. и физ.-матем. наук, 12, № 1, 75 (1963).
4. Шмыков А. А., Справочник термиста, 17, М., Машгиз, 1961.
5. Блох А. Г., Основы теплообмена излучением, М., Госэнергоиздат, 1962.
6. Митор В. В., Теплообмен в топках паровых котлов, М.—Л., Машгиз, 1963.
7. Гурвич А. М., Прасолов Р. С., Теплоэнергетика, № 7, 80 (1960).
8. Карасина Э. С., Невский А. С., Филимонов С. С., Адрианов В. Н., Хрусталева Б. А., Теплоэнергетика, № 2, 10 (1968).
9. Агабабов С. Г., Теплофизика высоких температур, № 1, 78 (1968).
10. Гурвич А. М., Ожигов Г. Е., Теплоэнергетика, № 12, 9 (1957).
11. Головин В. Н., Энергомашиностроение, № 6, 11 (1964).
12. Mulcahy M. F. R., Woow J., Goard P. R. C., J. Inst. Fuel, No. 308, 385 (1966).

Таллинский политехнический институт

Поступила в редакцию  
31/V 1968

#### V. SELG

#### KÜTTEPINDADE GAASIDEPPOOLNE SAASTUMINE

Tuukse andmeid tolm põlevkivi põletamisel kalorimeetri pinnale sadenevate saastade soojustehniliste näitajate kohta.

#### V. SELG

#### DIE GASSEITIGE VERSCHMUTZUNG DER HEIZFLÄCHEN

In Abhängigkeit von der Intensität der Wärmestrahlung, der Wandtemperatur und der Lage im Feuerraum des Brennschieferkessels wird die Außenfläche des Feuerraumkalorimeters von Ablagerungen bedeckt, was Veränderungen des Relativwärmeempfanges  $\psi_R$  hervorruft. Die im oberen Teil des Feuerraumes sich ablagernde dünne weiße staubähnliche Schicht der Aerosole verursacht infolge des niedrigen Strahlungsempfanges eine bedeutende Verminderung des Wertes  $\psi_R$  bis zu  $0,5 \div 0,6$ . Bei intensiver Verschmutzung verändert sich  $\psi_R$  im unteren Teil des Feuerraumes von  $0,9$  bis  $0,2$ ; im oberen Teil des Feuerraumes dagegen bleibt dieser Wert in den Grenzen von  $0,4 \div 0,7$ .