

УДК 676.495.8

Р.Т. Емельянов, Э.Г. Сурнин

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЗОЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

Представлены результаты исследований теплофизических и прочностных свойств золовых отложений, влияния золообразования котельного агрегата на теплопроводность различных поверхностей топочной камеры. Выявлено влияние на теплопроводность минерального состава и пористость золовых отложений.

Ключевые слова: угли, золовые отложения, теплопроводность, температура, пористость.

R.T. Emeliyanov, E.G. Surnin

THE RESEARCH OF ASH SEDIMENTS THERMALPHYSIC AND STRENGTHENING CHARACTERISTICS

The research results of ash sediments thermalphysic and strengthening characteristics, the influence of the boiler aggregate ash formation on the furnace camera surface thermal conductivity are presented. The influence on the thermal conductivity of ash sediment mineral composition and porosity is revealed.

Key words: coal, ash sediment, thermal conductivity, temperature, porosity.

Для оценки уровня напряжений в слое различных отложений, возникающих при водяной обдувке, и последующей сравнительной оценки локальной эффективности очистки водой топочных экранов автором решалась нестационарная задача теплопроводности и термоупругости. Для решения этой задачи возникла необходимость в данных по теплофизическим свойствам отложений. Расчет изменения температур по толщине отложений в момент обдувки позволяет определить уровень снижения «термошоков», значения которых используются при расчете ресурса труб. Данные по теплофизическим свойствам отложений, кроме того, используются для определения характеристик загрязненных температурных вставок, применяемых при исследованиях и в системах диагностики шлакования и загрязнения поверхностей нагрева.

В работе [1] приведены результаты исследований теплопроводности золовых отложений, образующихся при сжигании тощего и назаровского углей, в диапазоне температур 230–730°C. Для отложений, образующихся при сжигании тощего угля, коэффициент теплопроводности (λ) изменяется в пределах 0,11–0,12 Вт/мК (объемная масса отложений $\rho_{об} = 500\text{--}600$ кг/м³), для назаровского угля соответственно 0,08–0,15 Вт/мК ($\rho_{об} = 250\text{--}350$ кг/м³).

В [1] приведены данные по теплопроводности прочных железистых отложений, образующихся при сжигании подмосковного угля и сульфатносвязанных отложений назаровского угля. Теплопроводность отложений подмосковного угля возрастала в интервале температур 100–600°C от 0,38 до 0,62 Вт/мК, для отложений назаровского угля (в том же диапазоне температур) – от 0,28 до 0,45 Вт/мК.

Канско-ачинские угли имеют достаточно высокую зольность и склонны к образованию прочных золовых отложений на различных поверхностях нагрева, в том числе в топочной камере котельного агрегата. Исследование теплофизических характеристик этих отложений представляется достаточно актуальным в аспекте интенсификации процесса теплообмена в топочных камерах котлоагрегатов.

В работе [1] приведены результаты исследований теплопроводности золовых отложений, образующихся при сжигании тощего и назаровского углей, в диапазоне температур 230–730°C. Для отложений, образующихся при сжигании тощего угля, коэффициент теплопроводности (λ) изменяется в пределах 0,11–0,12 Вт/мК (объемная масса отложений $\rho_{об} = 500\text{--}600$ кг/м³), для назаровского угля соответственно 0,08–0,15 Вт/мК ($\rho_{об} = 250\text{--}350$ кг/м³). В [1] приведены данные по теплопроводности прочных железистых отложений, образующихся при сжигании подмосковного угля и сульфатносвязанных отложений назаровского угля. Теплопроводность от-

ложений подмосковного угля возрастала в интервале температур 100–600°C от 0,38 до 0,62 Вт/мК, для отложений назаровского угля (в том же диапазоне температур) от 0,28 до 0,45 Вт/мК.

Для анализа теплофизических характеристик отложений, образующихся при сжигании канско-ачинских углей, была поставлена задача обобщить и дополнить данные по их теплопроводности (λ) в зависимости от температуры (t), пористости (Π) и минералогического состава.

Пробы отложений (всего 25) отбирались в котлах: БКЗ-500-140-1 и БКЗ- 420-140 ПТ-1 Красноярской ТЭЦ-2, ПК-10Ш Красноярской ТЭЦ-1 и П-67 Березовской ГРЭС-1. На Красноярских ТЭЦ сжигался преимущественно бородинский уголь, на котле П-67 – березовский. Для исследования отложения снимались с различных поверхностей нагрева: экранов топки пароперегревателя и экономайзера. Характеристика отложений, образующихся при сжигании канско-ачинских углей, приведена в таблице.

Для определения значений теплопроводности использовался измеритель теплопроводности ИТ-л-400, который позволяет получить зависимость λ образца-таблетки от температуры t в режиме монотонного нагрева со скоростью 0,1°C/с вплоть до 400°C. Таблетки с пористостью менее 0,4 имели следующие размеры: диаметр 15 мм и высоту 1,9–5,6 мм.

Характеристика отложений, образующихся при сжигании канско-ачинских углей

Номер пробы	Тип котла	Поверхность нагрева	Ряд	Характеристика отложения	Пористость
1	БКЗ-500	КПП-4	1	Фронтальное, пристенный слой	0,15
2	БКЗ-500	КПП-3	1	Фронтальное, гребень, прочное	0,11
3	БКЗ-500	КПП-4	2	Фронтальное, гребень	0,31
4	БКЗ-500	ОТЗЭ	-	Фронтальное, гребень	0,30
5	БКЗ-500	Фестон	Посл.	Тыльное, слабосвязанное	0,23
6	БКЗ-500	ВЭ-2	2	Фронтальное, прочное	0,23
7	БКЗ-500	Экраны топки	-	Отметка 22 м	-
8	БКЗ-500	КПП-1	1	Фронтальное, прочное	0,21
9	БКЗ-500	Экраны топки	-	Отметка 18 м	0,15
10	БКЗ-500	КПП-3	1	Фронтальное, прочное	0,11
11	БКЗ-500	Экраны топки	-	Отметка 12 м	0,10
12	БКЗ-500	Экраны топки	-	Отметка 15 м	0,04
13	БКЗ-500	КПП-1	Посл.	Тыльное слабосвязанное	0,21
14	Б КЗ-500	КПП-1	1	Фронтальное, прочное	0,17
15	БКЗ-500	КПП-3	1	Фронтальное, прочное	0,03
16	БКЗ-500	КПП-3	посл	Тыльное слабосвязанное	0,25
17	БКЗ-500	Экраны топки	-	Отметка 12 м	0,31
18	Б КЗ-420	Экраны топки	-	Отметка 15 м	0,04
19	БКЗ-420	ВЭ-2	1	Фронтальное, прочное	0,29
20	П-67	КПП	2	Фронтальное, прочное	0,18
21	П-67	Экраны топки	-	Отметка 43 м	0,05
22	П-67	Экраны топки	-	Отметка 55 м	0,14
23	П-67	Экраны топки	-	Отметка 55 м	0,27
24	ПК-10Ш	Экраны топки	-	Первичные, отметка 16 м	0,11
25	ПК-10Ш	Экраны топки	-	Первичные, отметка 20 м	0,26

Изготовление таблеток из-за хрупкости отложений оказалось трудоемким, поэтому основное количество образцов было получено прессованием измельченных отложений (до прохода через сито 200 мкм). При этом обеспечивалось значение пористости прессованных таблеток также менее 0,4.

Пористость проб отложений и таблеток рассчитывалась по формуле

$$\Pi = 1 - \rho_{об} / \rho,$$

где $\rho_{об}$ – объемная масса, определяемая с помощью парафинирования и последующего гидростатического взвешивания образцов [1]; ρ – плотность материала отложений (частиц размером менее 200 мкм) по ГОСТ 2160-82 (пикнометрия в керосине).

Зависимость $\lambda = f(t)$ показана на рисунке 1. Для шлакового отложения ($\Pi = 0,632$, $\rho = 1,25 \cdot 10^{-3}$ 1/К, $\lambda_0 = 0,32$ Вт/мК) линейная зависимость сохраняется до температуры 900–1000°C, выше которой происходит спекание и оплавление образца с необратимым (при последующем понижении t) возрастанием λ .

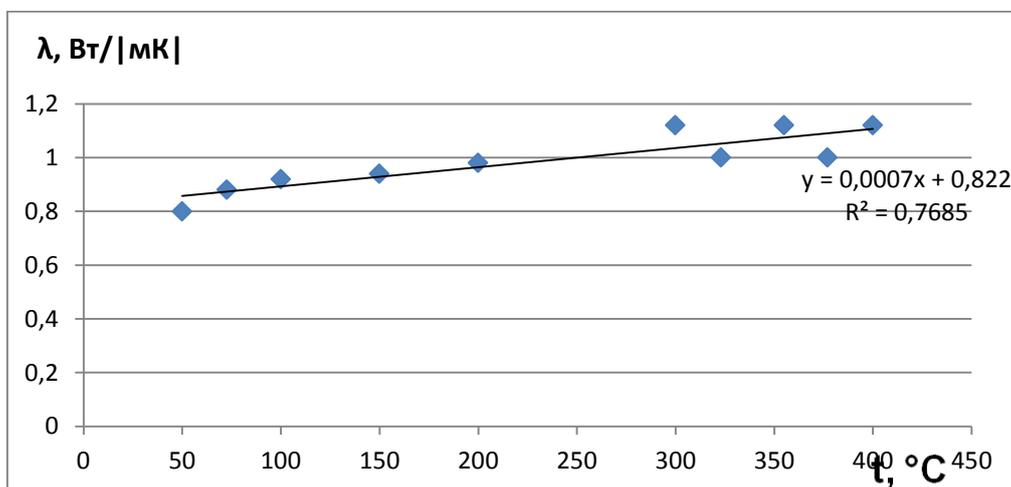


Рис. 1. Зависимость теплопроводности от температуры

Среднее арифметическое значение b , по данным измерений, составило $0,4 \cdot 10^{-3}$ 1/К за исключением отрицательных величин b для первичных железистых отложений. В соответствии с теорией [1] все полученные данные по λ_0 обобщены в зависимости от пористости отложений. В целом разброс данных оказался значительным. Величины выточенных таблеток близки к значениям λ_0 прессованных образцов, что подтверждает правомерность выбранной методики определения коэффициента λ , с прессованием измельченных отложений. Для того чтобы понять причины разброса данных, был проведен минералогический анализ четырех проб, а также привлечены другие материалы по минералогическому составу отложений.

Анализ данных позволяет выделить три группы отложений, для которых значения коэффициента теплопроводности заметно отличаются: ангидритные, первичные (железистые) и вторичные (шлаковые). Отложения с высоким содержанием CaSO_4 , условно названные ангидритными, наблюдаются на всех поверхностях нагрева и своим окрасом в изломе напоминают красный строительный кирпич.

Относительно высокие значения λ_0 имеют первичные отложения с экранов топки, богатые гематитом, причем с большим разбросом данных по коэффициенту теплопроводности ($\lambda_0 = 1,1\text{--}4,8$ Вт/мК). Обобщение данных для ангидритных отложений выполнено на основе следующей формулы [1]:

$$\lambda_0 = \lambda_T [0,5 + \cos(60 + \varphi)]^2,$$

где $\varphi = \arccos(1 - 2\Pi)$, $\lambda_T = 1,65$ Вт/мК.

Приведенная зависимость соответствует случаю, когда теплопроводность воздуха принята равной нулю и пригодна в диапазоне $\Pi = 0 - 0,5$. Величина коэффициента теплопроводности для твердой фазы без пористости $\lambda_T = 1,65$ Вт/мК (для ангидритных отложений) получена как экстраполяция имеющихся данных при их обработке. Для вторичных отложений в топке получены значения λ_0 меньше, чем для ангидритных отложений. Как показывают петрографические исследования, для вторичных отложений характерен рост содержания стекол (против прочих отложений), что может служить основной причиной понижения коэффициента теплопроводности для них (примерно на 0,5 Вт/мК).

По данным измерений теплоемкости золовых отложений не удалось выявить какой-либо зависимости от минерального состава и пористости. Для всех исследованных проб отложений значения объемной теплоемкости отличаются не более чем на 10% и в среднем составляют 3 МДж/м³К.

Для определения границ эффективного использования водяной обдувки топочных экранов наибольший интерес представляют наружные железистые отложения, имеющие высокую прочность и теплопроводность. Расчеты нестационарных полей температур и напряжений в слое отложений в момент водяной очистки проводились для двух типов железистых отложений. Первый – наиболее распространенный во всех исследованных котлоагрегатах с содержанием Fe₂O₃ 60–80% и теплопроводностью 1,0–1,5 Вт/мК. Второй – отложения, образующие тонкий первичный слой, включающие в себя также окалину, с теплопроводностью до 4 Вт/мК. Для обоих типов отложений принято среднее значение объемной теплоемкости 3 МДж/м³К соответственно. Расчеты проводились при следующих граничных условиях: воспринятый, тепловой поток q_w – 200 кВт/м²; коэффициент теплоотдачи на границе фронта обдувочной струи – поверхность отложений – 65 и 6,5 Вт/м²К. Меньшее значение соответствует условиям растекания водяной струи по поверхности золовых отложений (так называемые термошоки растечки).

Расчетная программа «Vitas» для решения одномерных задач нестационарной теплопроводности позволяет получить поля температур и напряжений в слое отложений в любой момент времени, включая начальный – до проведения водяной обдувки. Результаты проведенных расчетов представлены в виде трехмерных графиков и изолиний на рисунке 2. Как видно из рисунка, основное падение температуры на поверхности отложений происходит за 0,1–0,2 с. Дальнейшее охлаждение приводит к перестройке температурного поля по толщине слоя. Глубина распространения температурных возмущений не превышает 1 мм для обоих типов отложений.

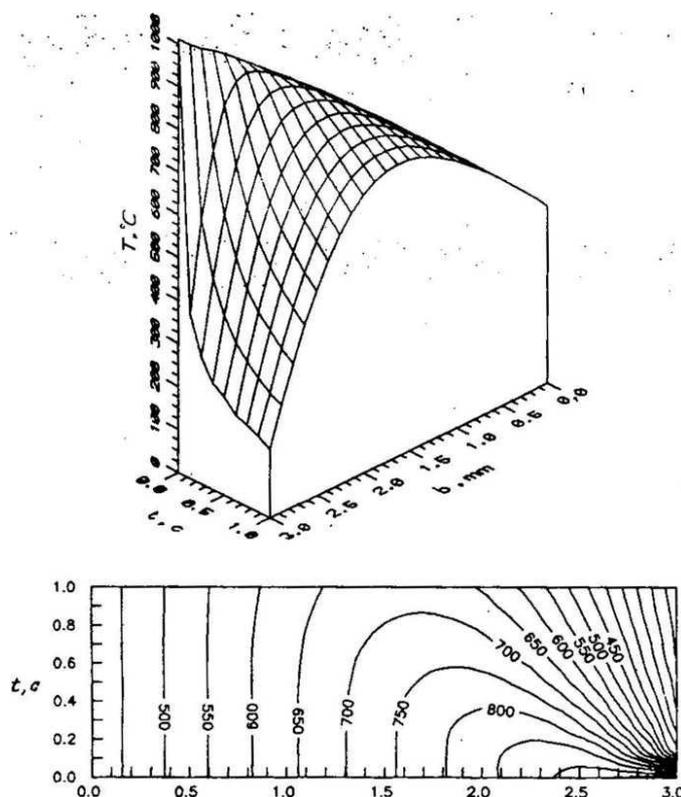


Рис. 2. Поле и изолинии температур в слое отложений в момент водяной обдувки ($\lambda = 1$ Вт/мК; $\alpha_n = 6,5$ Вт/м²К)

Отложения с высоким коэффициентом теплопроводности имеют более низкую температуру поверхности, поэтому напряжения, возникающие в слое этих отложений при водяной обдувке, в 2–3 раза меньше, чем в отложениях первого типа. Учитывая также то, что эти отложения имеют очень высокую прочность, можно ожидать низкую эффективность водяной обдувки. Этот вывод подтверждается результатами исследова-

дований, проведенных на котле БКЗ-500 ст.№5 Красноярской ТЭЦ-2 в начальный период эксплуатации, когда из-за неудовлетворительной организации процесса горения на топочных экранах образовывались очень прочные железистые отложения с коэффициентом теплопроводности до 4 Вт/мК.

Отложения первого типа имеют температуру наружной поверхности, при толщине слоя 3 мм и принятом тепловом потоке 200 кВт/м, на уровне 1000°С. Максимальные напряжения, возникающие на поверхности отложений в момент водяной обдувки, достигают 600 МПа, что должно вызвать разрушение наружного слоя отложений толщиной 2–3 мм (глубина распространения растягивающих напряжений не превышает 1,5–2 мм).

Для хрупких материалов наиболее опасными являются растягивающие напряжения. Применить методику испытаний на прочность при растяжении для образцов из материала топочных отложений не представляется возможным ввиду сложности изготовления больших партий стандартных образцов и реализации схемы одноосного растяжения. Поэтому при исследовании прочностных характеристик топочных отложений использовались косвенные методы определения прочности при растяжении. Наиболее простым при исследовании прочностных характеристик отложений оказался метод диаметрального сжатия. Сущность метода состоит в диаметральном приложении сжимающей нагрузки к цилиндрическому образцу (рис. 3,а), в результате чего в последнем возникает сложное напряженное состояние с характерным распределением растягивающих напряжений (рис. 3,б). При $\nu = 0,1d$ (d – диаметр образца) разрушение происходит под действием растягивающих напряжений, и в этом случае разрушающая трещина проходит по диаметру образца параллельно приложенной нагрузке. Величина предела прочности при растяжении определяется по формуле

$$\sigma_B = 2P_p / \pi dt,$$

где P_p – разрушающая нагрузка; d – диаметр образца; t – его толщина.

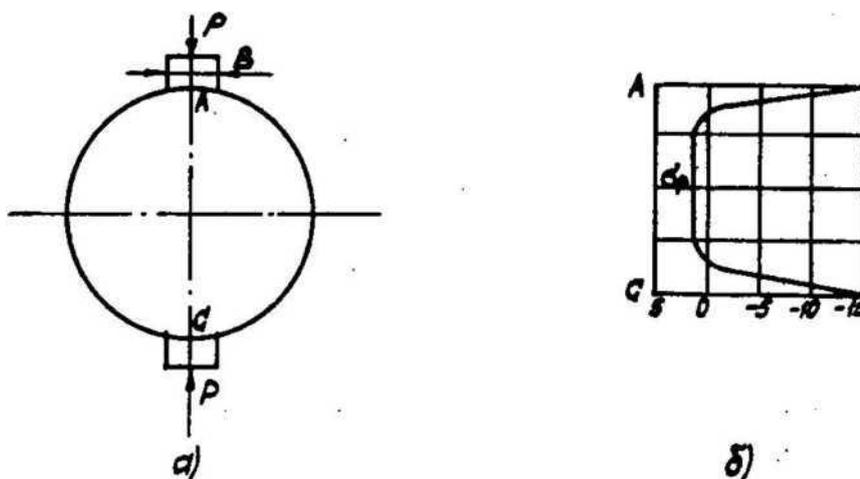


Рис. 3. Схема нагружения (а) и эпюра растягивающих напряжений (б)

Испытаниям на прочность были подвергнуты образцы диаметром 15 мм, изготовленные из топочных отложений путем обтачивания. Прочность основной массы исследованных проб топочных отложений при комнатной температуре изменялась в широком диапазоне – от 50 до 300 МПа. Очевидно, что неоднородность структуры и минералогического состава образцов привела к значительному разбросу данных. Особо следует отметить пробу прочных железистых отложений с теплопроводностью 4 Вт/мК, для которой предел прочности на растяжение превышает 500 МПа.

Температурная зависимость прочности огнеупорного керамического материала подразделяется на три интервала, существенно различных по характеру разрушения. Первый интервал ($T < T_1$) характеризуется чисто хрупким разрушением материала и часто сопровождается некоторым увеличением прочности по мере повышения температуры. Второй интервал ($T_1 < T < T_2$), в котором разрушению предшествуют незначительные пластические деформации, характеризуется интенсивным снижением прочности при увеличении температуры. В третьем интервале ($T > T_2$) разрушение может уже рассматриваться как пластичное, и ему иногда сопутствует более или менее ярко выраженное деформационное упрочнение. Температура T_1 находится в интервале 0,4–0,6 от температуры плавления, а T_2 в интервале 0,6–0,8 от температуры плавления. Таким образом, прочность отложений при комнатной температуре должна быть выше, чем в реальных условиях на

поверхностях нагрева работающего котла. Как было показано выше, эффективность водяной обдувки зависит от теплофизических и прочностных характеристик золовых отложений. Исходя из этого, оптимальные режимы очистки целесообразно уточнять для каждого конкретного котла.

Выводы. Общей рекомендацией для всех котлов, сжигающих канско-ачинские угли, является такая организация топочного режима, при которой максимально ограничивается образование и рост прочных железистых отложений, не удаляемых водяной обдувкой:

интенсификация теплообмена в топочной камере котлоагрегата путем реконструкции горелочных устройств либо организации вихревого сжигания, что предотвращает образование на топочных экранах твердых сульфатно-связанных и железистых отложений;

оптимизация схемы пылеприготовления с переходом на более грубый помол топлива;

принятие мер к ликвидации температурных и тепловых неравномерностей в топочной камере котлоагрегата, приводящих к образованию высокотемпературного ядра, расплавлению минеральной части угля и последующему заносу конвективных поверхностей.

При выборе режимов обдувки необходимо также учитывать скорость роста золовых отложений. Быстрый рост отложений приводит к их спеканию и оплавлению поверхностного слоя. Наличие оплавленного слоя значительно снижает эффективность водяной обдувки.

Литература

1. *Тиймка Т.Е., Пообус А.П.* Влияние свойств золовых отложений на тепловосприятие топочных поверхностей нагрева // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы паровых котлов: тез. докл. 4-й Всесоюз. конф. – Таллин, 1986. – Т.4. – С. 78–83.



УДК 626.175.3:627.1

Б.И. Кропоткин, О.И. Шеденко

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВОДОЗАБОРНО-ВОДОВЫПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЙ ТЭС И АЭС

Проведен анализ комплексных натурных исследований, состоящих из подводного обследования, измерений температуры воды на сбросном и водозаборном каналах и визуального состояния гидротехнических сооружений, по результатам которых выполняется проект реконструкции водоподводящей и водозаборной галерей.

Ключевые слова: водовыпускной канал, консольный водосброс, глубинный щелевой водозабор, водохранилище-охладитель, температурная стратификация, разноплотностные потоки.

B.I. Kropotkin, O.I. Shedenko

THE RESEARCH RESULTS OF WATER-INTAKE AND WATER-DISCHARGE CONSTRUCTIONS IN THERMAL POWER-STATION NUCLEAR POWER PLANT

The analysis of integrated full-sized studies, consisting of the underwater survey, water temperature measurements on the discharge and water intake canals and the hydraulic constructions visual condition is conducted. On the basis of this research the project of the water-supply and water-intake galleries reconstruction is carried out.

Key words: water outlet channel, console spillway, deep slit water-intake, reservoir-cooler, temperature stratification, flows of different density.

Введение. При использовании искусственно созданных или естественных водоемов в системах тепводоснабжения крупных тепловых и атомных электростанций в качестве охладителей, из-за введения в них большого количества низкопотенциального тепла посредством сброса больших объемов нагретой воды, возникает важнейшая проблема – сохранение существующего гидротермического режима или приближение вновь формируемого к естественно-бытовому [1, 2].

Цель работы. Повышение экономичности работы электрических станций.