

б) применение материалов с разными величинами коэффициента линейного расширения; в) изменение конструкции статора.

4. Необходимо проводить прочностные расчеты ГТД на переменных режимах с целью выяснения изменения величины радиального зазора и его правильного назначения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аэродинамика компрессоров / пер. с англ. Н. Кампсти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.

2. Дыбан, Е. П. Воздушное охлаждение деталей газовых турбин / Е. П. Дыбан, И. Т. Швец. – Киев: Наук. думка, 1974. – 488 с.

Представлена кафедрой  
турбинных двигателей и установок

Поступила 15.05.2006

УДК 621.311.22

### ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА ОТЛОЖЕНИЙ НА ПОВЕРХНОСТЯХ НАГРЕВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**Инж. НЕРЕЗЬКО А. В., докт. техн. наук, проф. КАРНИЦКИЙ Н. Б.,  
канд. техн. наук, доц. ЧИЖ В. А.**

*Белорусский национальный технический университет*

Повышение надежности, экономичности и экологичности энергетического оборудования является основным направлением развития мировой энергетики. Особое внимание уделяют надежности работы теплообменного оборудования (ТОО). Быстрое внедрение новых технологий в энергетику и повышение цен на топливо требуют современного подхода к обеспечению экономичности и надежности энергетического оборудования. Ранее используемые методы устаревают и требуют учета новых особенностей теплообмена и факторов загрязнения поверхностей ТОО нерастворимыми отложениями.

В результате анализа многолетнего опыта эксплуатации оборудования ТЭС установлено, что на механизм и интенсивность образования отложений существенное влияние оказывают, в первую очередь, материал теплообменной поверхности, ее электродный потенциал, условия омывания и температурные режимы [1].

При визуальном изучении характера распределения отложений выявлены следующие закономерности в гладких теплообменных трубах:

- из стали 20 – большая интенсивность отложений, характер которых зависит от режима течения: при ламинарном – образование отложений продольными рядами, при турбулентном – бессистемно;
- из стали 1Х18Н12Т – значительно меньшее количество отложений и распределение их в виде поперечных чешуек, которые формируются на

базе центров кристаллизации, основой для которых могут служить неровности и шероховатости.

Так, если для нержавеющей сталей 1X18H12T и 08X14MФ удельное количество отложений в зависимости от различных режимов работы может составить 20–60 г/м<sup>2</sup> за 3000 ч работы, то для стали 20 их в 8–10 раз больше и наблюдается разделение: верхние слои состоят из карбонатных отложений с удельным количеством 80–140 г/м<sup>2</sup>, внутренние пристеночные – из продуктов коррозии, которых в 6–8 раз больше.

Как известно, самыми ответственными элементами котла являются экранные трубы, которые испытывают высокие механические и температурные напряжения. Под воздействием внутритопочных высоких температур,

которые могут достигать более 1700 °С, металл претерпевает существенные структурные и фазовые изменения, что приводит к снижению его прочностных свойств, а следовательно, и надежности [2]. Зависимость допустимого напряжения котельных сталей от повышения температуры показана на рис. 1.

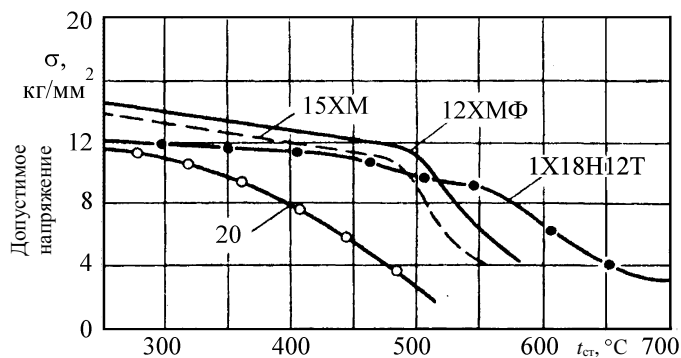


Рис. 1

Видно, что применяемые в энергетике перлитные, ферритные и аустенитные стали при температуре до 500 °С обладают относительно высоким сопротивлением к развитию трещин вследствие термической усталости. Особенно это характерно для аустенитных сталей, обладающих высокой пластичностью. Уже при температуре 550 °С отмечается интенсивный рост трещин в перлитных сталях, в аустенитных сталях этот эффект наблюдается при температурах 600–700 °С. В процессе работы котлоагрегата неизбежно появление как внутренних, так и наружных отложений на поверхностях нагрева, что влечет за собой ухудшение теплообмена и рост температуры металла трубы.

Причинами ухудшения температурного режима стенки трубы являются:

- выделение из воды труднорастворимых солей в процессе упаривания;
- коррозия металла;
- оседание и прикипание взвешенных веществ, находящихся в теплоносителе.

При большом количестве отложений имеет место снижение параметров котла по расходу пара, температуре и давлению, а также на водогрейных

котлах увеличивается гидравлическое сопротивление, что в конечном итоге приводит к повышению расхода топлива. Структура и состав отложений, образующихся на поверхностях нагрева, зависят от большого числа факторов, в частности от:

- технологических эксплуатационных параметров (температура, давление, скорость рабочей среды, удельные тепловые потоки);
- конструкторских решений (материал трубы, диаметр трубы, толщина стенки);
- качества используемой воды (общее солесодержание, содержание взвешенных частиц и их дисперсности, кислотности, содержание накипеобразующих ионов).

Отложения на поверхностях теплообменного оборудования весьма разнообразны по химическому составу, структуре, плотности, коэффициенту теплопроводности. Качественный состав и характер наиболее часто встречающихся отложений на поверхностях энергетического оборудования приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Примерный состав отложений на экранных трубах котлов различных параметров**

Тип котлоагрегата	Состав и характер отложений	Содержание, %
До 6,0 МПа	Железо в виде гематита, магнетита и различных шпинелидов типа $FeAl_2O_4$ , $ZnFeO_4$ , иногда в форме фосфатов	< 30
	Медь в виде тенорита и до 5 % в металлической форме	< 10
	Кремний в виде кварца $SiO_2$ безводных и гидратированных силикатов	< 50
	Алюминий в виде шпинелидов	< 10
	Органические вещества в виде соединений гуминовых кислот. Содержание – до 25 %	< 25
Свыше 6,0 до 11,0 МПа	Железо в виде гематита, магнетита, шпинелидов, фосфатов	< 30–50
	Медь в виде феррита $CuFe_2O_4$ , тенорита, фосфатов и в металлической форме	< 15
	Кремний в виде различных соединений с фосфатами, железом, кальцием, магнием	< 15
	Кальций и магний в виде карбонатов, сульфатов, фосфатов	< 30
	Алюминий в виде шпинелидов, фосфатов	< 10
	Органические вещества в виде соединений гуминовых кислот	< 10
Свыше 11,0 до 14,0 МПа	Железо в виде гематита, магнетита, шпинелидов	< 90
	Медь в виде феррита тенорита, фосфатов и в металлической форме	< 15–20
	Кремний в виде безводных силикатов	< 3
	Кальций и магний в виде карбонатов, сульфатов, силикатов	< 15
	Алюминий	< 8
	Органические вещества чаще отсутствуют	< 10

Окончание табл. 1

Тип котлоагрегата	Состав и характер отложений	Содержание, %
25,5 МПа	Железо при нейтрально кислородном водном режиме:	< 85–95

	в наружном рыхлом слое в виде гематита, во внутреннем – в виде магнетита	
	Медь в металлической форме, феррита, тенорита. Наибольшее содержание в НРЧ в районе зажигательного пояса	< 15
	Кремний в виде безводных силикатов	< 0,1
	Кальций и магний	< 0,1
	Алюминий	< 0,1

Из табл. 1 видно, что основу отложений в котлах с параметрами пара свыше 11,0 МПа составляют соединения железа (60–95 %), состоящие из магнетита и гематита.

Визуальные исследования структуры отложений на сколах и срезах указывают на формирование отложений двух типов по структуре: кристаллического и смешанного. Отложения кристаллического типа состоят из беспорядочно перемешанных кристаллических форм  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  и др. Они характерны для систем с низким солесодержанием, когда солеобразование происходит непосредственно на теплообменной поверхности. Смешанная структура отложений состоит из комков, пространство между которыми заполнено более мелкими кристаллами солей, которые образуются на поверхностях нагрева с высокими тепловыми потоками.

Значения коэффициентов теплопроводности отложений [3] находятся в диапазоне  $K_T = 0,1–7,0$  Вт/(м·°С). Наибольшую опасность представляют силикатная накипь и накипь, пропитанная маслом, теплопроводность которой в 300 раз ниже теплопроводности чугуна или стали.

Плотно приставшие к поверхности отложения менее опасны, чем слабосидящие, так как зазор, образующийся между металлической стенкой и отложениями, сильно увеличивает температурный напор и приводит к опасному местному перегреву металла.

На рис. 2 приведена зависимость температуры стенки трубы от толщины отложений при различных коэффициентах теплопроводности для экранной трубы  $\varnothing 60 \times 6$  мм из углеродистой стали 20 при минимальном давлении в барабане 15,5 МПа. Рисунок построен на основании известной формулы

$$t_{\text{ст.н}} = t_s + \beta \mu q \left( \frac{\delta_m}{\lambda_m} \frac{2}{1+\beta} + \frac{\delta_0}{\lambda_0} + \frac{1}{\alpha_2} \right),$$

где  $t_{\text{ст.н}}$  – температура наружной поверхности стенки трубы;  $t_s$  – температура котловой воды;  $\beta$  – отношение наружного диаметра трубы к внутреннему;  $\mu$  – коэффициент растечки теплоты;  $q$  – воспринятая тепловая нагрузка;  $\delta_m$ ,  $\delta_0$  – толщины стенки трубы и отложений;  $\lambda_m$ ,  $\lambda_0$  – коэффициенты теплопроводности металла стенки трубы и отложений;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к обогреваемой среде.

В условиях обогрева указанная температура [4] достигается при плотности теплового потока  $q = 542$  кВт/м<sup>2</sup>. Остальные величины составляют:  $t_s = 345$  °С;  $\beta = 1,25$ ;  $\mu = 1$ ;  $\alpha_2 = 22,3$  кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda_m = 41,5$  кВт/(м·К).

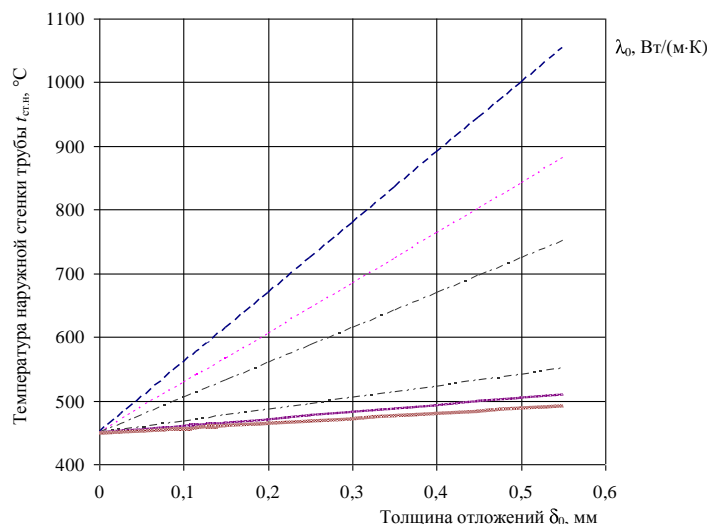


Рис. 2. --- — 0,5 Вт/(м·К); - - - - 0,7; - - - - 1,0; - - - - 3,0; — — 5,0; ~ ~ ~ ~ 7,0 Вт/(м·К)

Из рис. 2 следует, что достаточно незначительного (0,1–0,3 мм) по толщине слоя накипи на поверхности наиболее теплонапряженных экранных труб, чтобы температура металла труб достигла 500 °С. Это за сравнительно короткий период работы парогенератора приводит к разрыву паробразующих труб, увеличению температуры уходящих газов и снижению КПД котлоагрегата.

Результаты многочисленных исследований показали, что отложения представляют собой неметаллические гетерогенные дисперсные системы, состоящие из двух компонентов – твердого (зернистого) и среды, заполняющей поры [5]. Структура таких образований отличается по тракту котла даже для двух близких участков поверхностей нагрева. Теплопроводность таких образований в равной, а иногда и в большей степени зависит не столько от структуры системы, сколько от теплофизических свойств и химического состава.

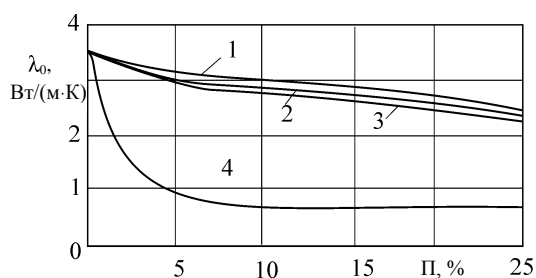


Рис. 3. Расчетные зависимости теплопроводности от пористости отложений с учетом парогазовой пористости: 1 – Ландау – Лифшиц; 2 – Бир; 3 – Лорентц – Лоренц; 4 – Цвиклер

Наибольшее влияние оказывает пористость структуры. Снижение пористости приводит к уменьшению теплопроводности [1]. Расчетные исследования определения теплопроводности многокомпонентных структур различными методами показаны на рис. 3.

В настоящее время за характеристику степени загрязненности труб принимают значение удельного количества отложений. По этой величине определяются сроки межпромывочного периода котлоагрегатов. Однако только удельное количество отложений не определяет значение, создаваемое слоем теплового сопротивления, которое значительно зависит от их структуры, т. е. от объемной плотности, размеров частиц конгломератов, пор, природы контактов между частицами и свойств среды, заполняющей поры. Способы борьбы с загрязнениями в теплообменном оборудовании тепловых и атом-

ных электростанций по имеющимся данным классифицируются по трем основным направлениям: химические, физические и механические.

Химические способы борьбы заключаются в обработке воды разными химическими соединениями:

- неорганическими – смещение растворимости;
- органическими – стабилизация взвеси;
- биологическими – подавление микроорганизмов.

Физические способы подразделяют на следующие виды обработки воды:

- магнитный;
- ультразвуковой;
- ультрафиолетовый;
- электромагнитный;
- электростатистический.

При применении механических способов используют:

- щетки;
- шарикоочистку;
- гидромеханическую промывку;
- термический стресс;
- механические колебания теплообменных поверхностей;
- промывку водовоздушной эмульсией;
- промывку газированной водой.

Если штатные средства измерения позволяют контролировать текущие значения коэффициента теплопередачи то, используя математическую модель определения теплопроводности и толщины образовавшихся отложений, можно достаточно точно прогнозировать периодичность промывок и увеличивать экономичность работы оборудования. В настоящее время существует множество различных способов, методов, моющих композиций для поддержания теплообменных поверхностей оборудования ТЭС в чистом состоянии, однако среди всего разнообразия способов снижения интенсивности образования отложений и их удаления нет универсального метода, который позволил бы применять его во всех случаях. Для этого требуется комплексный подход к решению данной задачи с учетом типа оборудования, параметров теплоносителя, характера и химсостава отложений.

## ВЫВОД

Показано влияние материала поверхности нагрева, конструктивных особенностей, условий эксплуатации теплообменных устройств и водно-химического режима на химический и структурный состав отложений, их теплопроводность и пористость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б у б л и к о в, И. А. Научные принципы диагностирования и разработка методов снижения интенсивности образования отложений в теплообменном оборудовании тепловых атомных электростанций: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.14/НПИ. – Новочеркасск, 2004.
2. Б е л о к о н о в а, А. Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций / А. Ф. Белоконова. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Х о л щ е, В. В. О температуре стенки экранной трубы барабанного котла / В. В. Холще // Теплоэнергетика. – 1998. – № 10.
4. Ш к р о б, М. С. Водоподготовка / М. С. Шкроб, В. Ф. Вихрев. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.
5. Ч у д н о в с к а я, И. И. Термическое сопротивление внутритрубных образований при наличии кипения / И. И. Чудновская, З. Ю. Штерн, М. А. Готовский // Теплоэнергетика. – 1984. – № 7.

Представлена кафедрой  
тепловых электрических станций

Поступила 1.09.2006