

ДИНАМИКА СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ЗОЛЫ И САЖИ ПРИ СЖИГАНИИ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В КОТЛАХ

Представлены результаты экспериментальных исследований динамики процесса загрязнения поверхностей нагрева котлов и влияние этих процессов на выбросы золы и сажи при сжигании водомазутных эмульсий с разным содержанием воды.

Results of experimental researches dynamics of pollution process low-temperature heating boilers with different water maintenance of water-fuel emulsion are presented.

Актуальность, постановка проблемы. Снижение выбросов золы и сажи, а также предотвращение загрязнения низкотемпературных поверхностей нагрева (НТПН) и газового тракта котлоагрегатов является одним из приоритетных направлений повышения экологической безопасности и эффективности работы котельных установок, в которых сжигаются сернистые топлива. Наличие слоя загрязнений на НТПН котла приводит к увеличению аэродинамического сопротивления, что определяет периодичность очистки поверхностей нагрева и затраты энергии на преодоление этих сопротивлений (затраты на привод вентиляторов). Под загрязнениями подразумевается сумма масс продуктов коррозии, оставшейся на поверхности нагрева кислоты и осадившихся отложений. Загрязнения и продукты коррозии поверхностей нагрева образуют слой отложений, содержащий большое количество коррозионно-активных соединений, что приводит к коррозии и вызывает необходимость проведения ремонтно-восстановительных работ. Загрязнения являются термическим сопротивлением, ухудшающим теплопередачу, приводя к перерасходу топлива. Наличие слоя загрязнений приводит к снижению КПД котла.

Для снижения выбросов золы и сажи и повышения эффективности борьбы с нежелательным влиянием загрязнения и определению режимов удаления отложений необходимо иметь представление о закономерностях динамики образо-

вания и роста слоя загрязнений. Поэтому представляет интерес получение зависимости приращения их массы, на основании чего можно получить зависимости скорости и ускорения роста толщины слоя и определить периодичность очистки НТПН с целью обеспечения приемлемых уровней аэродинамических сопротивлений и интенсивности теплопередачи как при сжигании стандартных сернистых топлив, так и при сжигании водомазутных эмульсий (ВМЭ), приготовленных на их основе.

Анализ литературных источников. Формирование слоя загрязнений на НТПН является сложным процессом, зависящим от многих факторов. Отложения золы, сажи и продуктов коррозии на НТПН могут формироваться с весьма высокими скоростями, они имеют связанную структуру и часто, обладая высокой прочностью, плохо поддаются удалению. В первую очередь имеет значение вид и качество исходного котельного топлива, его обводненность, технология его подготовки к сжиганию и организация процесса горения. В [1-4] указывается, что для предотвращения образования связанных низкотемпературных отложений на поверхности нагрева котла следует обеспечить условия ее работы с температурами стенки выше температуры точки росы (ТТР) паров H_2SO_4 ($t_{cr} > t_p^{H_2SO_4}$) при сжигании сернистых жидких топлив, что снижает КПД котлов. Интенсивный занос НТПН начинается при температуре стенки ниже ТТР ($t_{cr} < t_p^{H_2SO_4}$). Это объясняется

тем, что количество конденсирующейся влаги увеличивается и соответственно осажается большее количество летучей золы и сажи, усиливается коррозия. В [3] также указывается, что интенсификация образования отложений в условиях конденсации влаги ($t_{ст} < t_p^{H_2SO_4}$) объясняется увеличением сил адгезии летучей золы и сажи к поверхности нагрева при наличии пленки сконденсировавшейся кислоты, а также сил аутогезии (сцепления частичек друг с другом).

Изучению процессов коррозии и загрязнения НТПН котлов посвящены работы, обобщенные в монографиях [1, 2, 4] и статьях [8, 11, 13]. Меньшее внимание исследователей уделялось динамике развития этих процессов. Результаты исследований динамики загрязнения опубликованы в небольшом количестве работ [1, 8, 9]. Приведенные в этих работах результаты исследований не позволяют получить представление о динамике отложений в начальный период их образования, а также не дают полного понимания прогнозирования динамики отложений на более длительный срок при сжигании ВМЭ при изменении их водосодержания.

Анализ литературных данных, посвященных проблеме роста массы загрязнений показал, что этот процесс описывается функцией $\Delta G = c \cdot t^n$ [1, 9], либо функцией типа $\Delta G = b(1 - e^{-mt})$ [6], где ΔG – интенсивность роста массы загрязнений, г/м²; t – время их образования, ч; b, c, m, n – функциональные коэффициенты, зависящие от режимных параметров (температуры стенки, содержания серы в исходном топливе), но неизменные во времени. В [6] отмечено, что масса загрязнения резко возрастает в течение первых 2...6 часов, после чего рост ее замедляется. Полученные в [6] зависимости имеют коэффициент корреляции больше 0,5, что, по мнению автора, достаточно для описания процессов загрязнения при проведении исследований. В [10] указывается, что после 5...6 ч скорость загрязнения резко падает. По данным [10] на участке 12...20 ч кривая загрязнения практически приближается к прямой, и, видимо, дальнейший рост загрязнения может быть описан уравнением прямой в виде $\Delta G = a + d\tau$, коэффициенты которого легко определить. В работе [11] с точностью $\pm 20\%$ получены зависимости скорости роста массы отложений от времени, причем эти уравнения также были описаны степенными функциями.

Следует также отметить, что представленные в указанных выше работах результаты экспериментальных исследований были получены на промышленных котельных установках при сжигании обычных стандартных мазутов или твердого топлива в условиях переменных режимов работы. Авторы [12] считают, что можно получить подобные зависимости менее чем за 2 часа, но так как стабилизация процессов загрязнения и коррозии наблюдается лишь только после 8...10 часов воздействия потока дымовых газов, то для

этого необходимо экспериментальное подтверждение. В работе [3] указано, что математическое описание этих процессов по результатам исследований за 4 часа осложнено тем, что в этот период времени образуется пленка конденсата, на которую начинают налипать твердые частицы золы и сажи из потока дымовых газов.

Согласно [13], наибольшую скорость роста первичных отложений в первые минуты работы котлоагрегата можно объяснить наличием сил межмолекулярного притяжения при отсутствии конденсации кислоты на поверхности. За счет этих сил происходит интенсивное осаждение на чистую поверхность трубы наиболее мелких фракций летучей золы (до 3 мкм). Мелкие частицы являются главными носителями сконденсировавшихся на них паров из газового потока. Резкое снижение скорости роста отложений за первые 2 ч работы котлоагрегата объясняется нарушением аэродинамики потока газов за счет появившихся с фронта “гребешков” с крупными размерами частиц, формирующих отложения. После 2-х часов работы процесс налипания частиц на поверхность нагрева и срыва с нее, в основном, стабилизируется, и скорость роста слоя отложений изменяется весьма незначительно.

В [8] утверждается, что сжигание обводненных мазутов должно привести к уменьшению загрязнения поверхностей нагрева по сравнению со сжиганием “сухих” мазутов. Следует также учитывать, что уменьшение отложений на поверхностях нагрева резко снижает скорость коррозии.

В [7] приведены результаты исследований сжигания орэмульсии (сравнительно дешевое эмульгированное битумное топливо, получаемое из высоковязкой нефти, состоящее из частиц битума (70 %) и очищенной воды (30 %) с незначительными добавками эмульгирующего реагента) или мазута М40 методом тяжелой кавитации. Результаты приведенных исследований показали, что тяжелая кавитация при распыливании орэмульсии или мазута М40 за две недели позволила очистить верхние трубы конвективного пароперегревателя до металлического блеска, уменьшить суммарное загрязнение больше чем на 13 %, снизить образование прочных отложений и изменить их распределение по газоходам. Явление тяжелой кавитации наблюдается при работе кавитатора с высоким давлением (около 6,0 МПа) с числом Заутера около 80 мкм при числе кавитации в горловине сопла Вентури $\sigma_f < 0,2$. Множественный кумулятивный удар устранял образование легкоплавких эвтектик и приводил к самоочистке пароперегревателя до металлического блеска. Все это продлило кампанию между остановками котла на очистку, облегчило эксплуатацию и текущий ремонт при его работе без добавок к мазуту, исключило необходимость дробеочистки и уменьшило на 0,8 кВт·ч на 1 т пара расход энергии на собственные нужды. Кроме того,

количество выбросов NO_x было снижено на 28 %. Очистка пиками и дробеочистка при их эксплуатации не требовались, так как даже легкая кавитация изменяла физическую основу и химическую структуру загрязнений.

Таким образом, видно, что у исследователей нет общего окончательного представления о характере рассматриваемых процессов и, следовательно, представляет интерес его дальнейшее изучение. Особый интерес представляет рассмотрение процессов при сжигании водомазутных эмульсий, приготовленных на основе стандартных топлив.

В первые часы работы котлоагрегата наблюдается ускоренный режим осаждения частиц из газового потока, адгезии их с поверхностью нагрева и аутогезии, вследствие чего возникает переходный процесс до установившегося состояния. Во время переходного процесса загрязнение изменяется по некоторой кривой от начального до конечного состояния. Таким образом, загрязнение можно представить в виде двух процессов: первый (в интервале от 0 до 2 ч) – разгонный участок с запаздыванием и второй (начиная с 2 ч) – процесс при установившемся динамическом равновесии объекта.

Цели настоящего исследования – оценить влияние содержания воды и коэффициента избытка воздуха в топливе на динамику развития процессов массопереноса кислоты, коррозии и загрязнения НТПН котлов; разработать методику прогнозирования выбросов золы и сажи на любое время работы котлоагрегата по интенсивности отложений на поверхностях нагрева, как при сжигании обычного стандартного, так и эмульгированного топлива, зная динамику загрязнений

НТПН по результатам экспериментальных исследований, полученным за непродолжительное время (ввиду сложности их проведения).

Изложение основного материала. В зависимости от интенсивности загрязнения НТПН котлов, которое определяется состоянием поверхности (наличие пленки конденсата) и количеством осевших отложений золовых и сажистых частиц, снижаются выбросы золы и сажи в атмосферу. Кроме того, вследствие изменения интенсивности теплопередачи в результате загрязнения, меняется величина теплового загрязнения атмосферы, так как растет температура уходящих из котла газов.

Для получения зависимостей интенсивности отложений на НТПН как при сжигании обычного мазута, так и при сжигании ВМЭ с различной степенью обводненности были проведены исследования динамики процессов загрязнения НТПН при различных режимах работы установки (было проведено 12 экспериментов при сжигании различных топлив с различным содержанием воды и серы и разным коэффициенте избытка воздуха). Исследования проводились на экспериментальной установке при стабильном режиме горения, в отличие от результатов промышленных исследований [10], где режимы переменные. Данные экспериментов были получены при температурах стенки в районе “сернокислотного пика” $t_{cm} = 105...115$ °C в течение 2...12 ч для построения зависимостей, а также в течение 100 часов для оценки достоверности полученных в течение 2...12 ч уравнений прогноза развития загрязнения поверхностей нагрева. Результаты наших экспериментов и данных [10] для сравнения приведены в табл.1.

Таблица 1

Результаты экспериментов

Топливо	Состав топлива, %		Коэффициент избытка воздуха α	Масса загрязнений ΔG , г/м ²					Расчетные значения экспериментов	
	S ^o	W ^o		Время τ , ч					Уравнение регрессии $\Delta G = c \cdot \tau^b$	Значение коэффициента детерминации R ²
				2	4	8	12	100		
Мазут М100	2	2	1,01	20	27	35	42	98	$\Delta G = 15,134 \cdot \tau^{0,4039}$	0,9989
	2	2	1,025	32	45	62	76	207	$\Delta G = 22,993 \cdot \tau^{0,4801}$	0,9990
Мазут М40	1,5	2	1,25	22	26	30	32	55	$\Delta G = 19,193 \cdot \tau^{0,2104}$	0,9940
	0,98	2	1,35	39	47	56	62	114	$\Delta G = 32,702 \cdot \tau^{0,2594}$	0,9990
	1,8	2	1,5	80	90	102	108	148	$\Delta G = 71,197 \cdot \tau^{0,6197}$	0,9980
ВМЭ на основе мазута М40	1,8	10	1,35	90	100	108	118	163	$\Delta G = 81,340 \cdot \tau^{1,1450}$	0,9870
	1,8	15	1,2	94	100	115	118	157	$\Delta G = 84,863 \cdot \tau^{1,1374}$	0,9620
	0,98	15	1,35	31	36	40	45	73	$\Delta G = 27,020 \cdot \tau^{0,1997}$	0,9890
	1,75	17	1,25	80	95	104	112	158	$\Delta G = 71,681 \cdot \tau^{0,8121}$	0,9800
	1,5	30	1,25	35	43	48	52,5	88	$\Delta G = 30,645 \cdot \tau^{0,2196}$	0,9810
	0,98	30	1,35	43,2	57,4	64	70	135	$\Delta G = 37,522 \cdot \tau^{0,2594}$	0,9520
	1,8	30	1,45	9,2	22	34	46,8	–	$\Delta G = 5,4953 \cdot \tau^{0,8851}$	0,9740
Данные [10] мазут М100	3,2	1,9	1,15...1,20	35	42	61	72	129	$\Delta G = 27,517 \cdot \tau^{0,3412}$	0,9220

Результаты экспериментов были обработаны на ЭВМ с помощью специальных статистических программных комплексов. Проведенный сравнительный анализ (нахождение уравнений регрессии с помощью различных функций: линейная, степенная, логарифмическая, экспоненциальная, логистическая, сигноидальная, полиномиальная) показал, что с наименьшим отклонением они описываются степенной функцией вида $\Delta G = c \cdot \tau^d$, при этом коэффициент детерминации $R^2 = 0,91 \dots 0,99$, т.е. выше 0,8 для всех рассматриваемых режимов, что, с точки зрения теории статистики, говорит о малой дисперсности полученных данных и достаточно высокой достоверности полученных уравнений регрессии. При обработке результатов исследований было принято, что процесс загрязнения подчиняется степенной функции с данного начала воздействия потока дымо-

вых газов, без учета закономерностей переходного (разгонного) процесса, который имеет место в начальной стадии загрязнения. Полученные уравнения регрессии для проведенных экспериментов представлены в табл. 1.

Полученные зависимости по наиболее характерным режимам представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что кривые, полученные по результатам наших экспериментов, имеют сходный характер с результатами, полученными в [12].

Ввиду отсутствия экспериментальных данных на начальном (разгонном) участке (интервал от 0 до 2 ч) для оценки влияния этого участка на прогнозируемые значения ΔG при длительном воздействии загрязненного потока дымовых газов целесообразно воспользоваться нахождением передаточных функций, используемых при разработке систем автоматического регулирования [14].

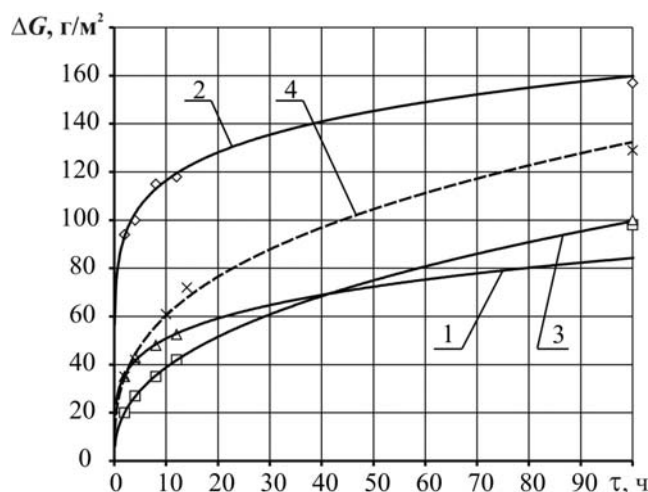


Рис. 1. Изменение массы загрязнений на поверхности нагрева при сжигании:

1 – мазута марки М100 ($W^r = 2\%$, $S^r = 2\%$, $\alpha = 1,01$); 2 – ВМЭ на основе мазута марки М40 ($W^r = 15\%$, $S^r = 1,8\%$, $\alpha = 1,20$); 3 – ВМЭ на основе мазута марки М40 ($W^r = 30\%$, $S^r = 1,5\%$, $\alpha = 1,25$); 4 – мазута М 100 ($W^r = 1,9\%$, $S^r = 3,2\%$, $\alpha = 1,15 \dots 1,20$) [10]

Описание разгонного участка процесса загрязнения можно получить с достаточной точностью с помощью нескольких методов: методом аппроксимации переходной функции решением дифференциального уравнения первого или второго порядка; с помощью сигноидальной пятипараметрической функции [14]. Проведенный сравнительный анализ показал, что наиболее приемлемым является метод аппроксимации переходной функции решением дифференциального уравнения второго порядка. При этом динамические свойства объекта приближенно описываются передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)},$$

где k – коэффициент усиления объекта; T_1 и T_2 – коэффициенты, называемые постоянными времени.

Переходная функция объекта аппроксимируется решением линейного дифференциального уравнения второго порядка при T_1 и $T_2 \geq$

$$\Delta G = \Delta G^{\max} \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{\tau}{T_2}} \right),$$

где τ – время чистого запаздывания; ΔG , ΔG^{\max} – текущее и максимально устойчивое значение роста массы загрязнения соответственно.

Время чистого запаздывания τ и коэффициент усиления k определяются обычными приемами по переходной функции [14]. Следовательно, задача сводится к нахождению постоянных коэффициентов T_1 и T_2 . На ЭВМ была реализована программа, позволяющая методом последовательных приближений определить значения T_1 и T_2 при заданных значениях ΔG^{\max} и τ .

Так как имеются результаты прямых измерений ΔG начиная с $\tau = 2$ ч, то полученные расчетные зависимости переходной функции следует считать достоверными, если кривая $\Delta G = f(t_{\text{ст}})$ будет проходить через точку при $\tau = 2$ ч.

Вследствие этого найденные уравнения динамики не нуждаются в дополнительной проверке на объекте, так как все индивидуальные особенности его конструкции и режима работы уже учтены формой переходного процесса ΔG [14].

Было принято решение построения разгонных кривых по переходной функции решением дифференциального уравнения второго порядка с запаздыванием. Для этого принимается в качестве точки начала постоянной скорости роста слоя

загрязнений ΔG^{\max} при $\tau = 2$ часа, т.е. наиболее вероятное время разгонного участка составляет от 0 до 2 часов, т.к. после этого времени наблюдалось равномерное увеличение скорости загрязнения.

На ЭВМ была составлена программа расчета переходной функции решением дифференциального уравнения второго порядка для описания динамики загрязнения за первые 2 ч работы. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Уравнения регрессии для описания процесса загрязнения

Топливо	Состав топлива, %		Коэффициент избытка воздуха α	Уравнения интенсивности загрязнения при ($\tau = 0 \dots 2$ ч)
	S'	W'		
Мазут М100	2	2	1,01	$\Delta G' = 22 + 57,75 \cdot e^{-2,3810\tau} - 79,75 \cdot e^{-1,7241\tau}$
	2	2	1,025	$\Delta G' = 36 + 144 \cdot e^{-2,0833\tau} - 79,75 \cdot e^{-1,6667\tau}$
Мазут М40	1,5	2	1,25	$\Delta G' = 24 + 24,77 \cdot e^{-3,1250\tau} - 48,77 \cdot e^{-1,5873\tau}$
	0,98	2	1,35	$\Delta G' = 43 + 18,61 \cdot e^{-4,5455\tau} - 61,19 \cdot e^{-1,3514\tau}$
	1,8	2	1,5	$\Delta G' = 83 + 110,67 \cdot e^{-3,5714\tau} - 193,67 \cdot e^{-2,0408\tau}$
ВТЭ на основе мазута М40	1,8	10	1,35	$\Delta G' = 96 + 128,04 \cdot e^{-3,2258\tau} - 223,04 \cdot e^{-1,8519\tau}$
	1,8	15	1,2	$\Delta G' = 96 + 74,667 \cdot e^{-4,7619\tau} - 170,67 \cdot e^{-2,0833\tau}$
	0,98	15	1,35	$\Delta G' = 33 + 14,25 \cdot e^{-5,2632\tau} - 47,25 \cdot e^{-1,5873\tau}$
	1,75	17	1,25	$\Delta G' = 86 + 125,09 \cdot e^{-3,1250\tau} - 211,09 \cdot e^{-1,8519\tau}$
	1,5	30	1,25	$\Delta G' = 38 + 10,755 \cdot e^{-6,6667\tau} - 48,755 \cdot e^{-1,4706\tau}$
	0,98	30	1,35	$\Delta G' = 48 + 32,43 \cdot e^{-4,0000\tau} - 80,43 \cdot e^{-1,6129\tau}$
	1,8	30	1,45	$\Delta G' = 15 + 110,45 \cdot e^{-1,2345\tau} - 125,45 \cdot e^{-1,0869\tau}$
Данные [10] Мазут М100	3,2	1,9	1,15...1,20	$\Delta G' = 39 - 52,65 \cdot e^{-1,2345\tau} + 13,65 \cdot e^{-4,7619\tau}$

Так как по результатам исследования интенсивности процесса загрязнения имеются в основном экспериментальные данные за 2, 4, 8 и 12 часов, то с целью оценки достоверности прогноза исследований было проведено сравнение экспериментальных данных, полученных за 100 часов воздействия потока дымовых газов и прогнози-

руемых значений по полученным уравнениям (см. рис. 1).

По данным табл. 2 были построены графики (рис. 2) для разгонного участка для режимов, соответствующих режимам, представленных на рис. 1.

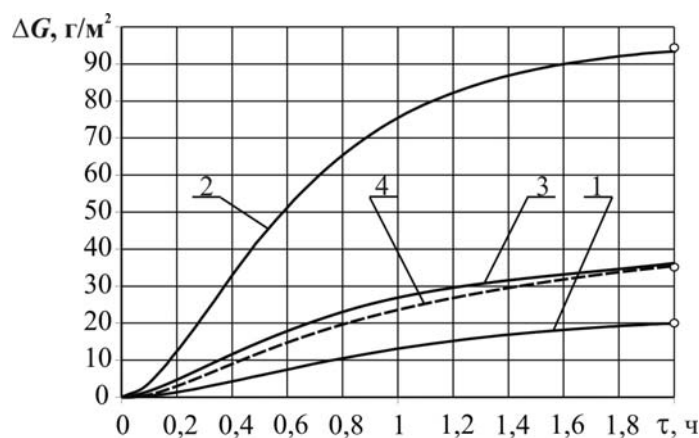


Рис. 2. Изменение массы загрязнений на поверхности нагрева на разгонном участке (до 2 ч) (номера кривых на рис. 2 соответствуют рис. 1)

Зависимость скорости ускорения образования загрязнений можно получить последовательным дифференцированием уравнений, представленных в табл. 1 и 2 (рис. 3). Из рис. 3 видно, что при сжигании ВМЭ скорость образования загрязнений выше. Это объясняется более высоким

содержанием кислоты при сжигании ВМЭ вследствие снижения коррозии из-за образующейся на поверхности металла труб защитной пассивирующей пленки. Стабилизация скорости роста загрязнений наступает примерно после 4...8 часов работы.

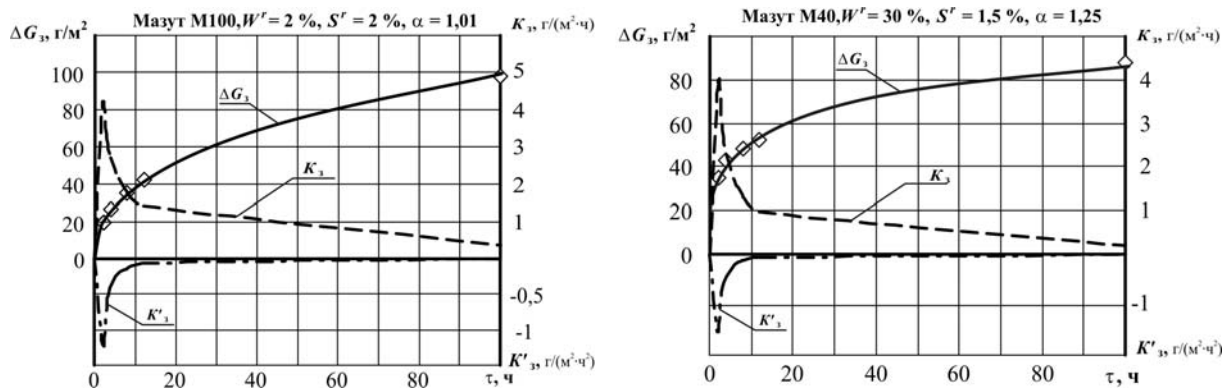


Рис. 3. Зависимость интенсивности роста ΔG_z , скорости K_z и ускорения K'_z загрязнений от времени протекания процесса

В интервале температур стенки от 50 до 130 °С были проведены специальные исследования конденсации паров H_2SO_4 с целью оценки интенсивности процесса конденсации. Проведенные исследования показали, что конденсация кислоты на поверхности образца начиналась

мгновенно и стремительно возрастала за короткий промежуток времени – в течение 1...3 секунд (см. рис. 4). В среднем через 30...40 секунд процесс конденсации достигал своего максимального значения и стабилизировался как при сжигании стандартного мазута, так и при сжигании ВМЭ.

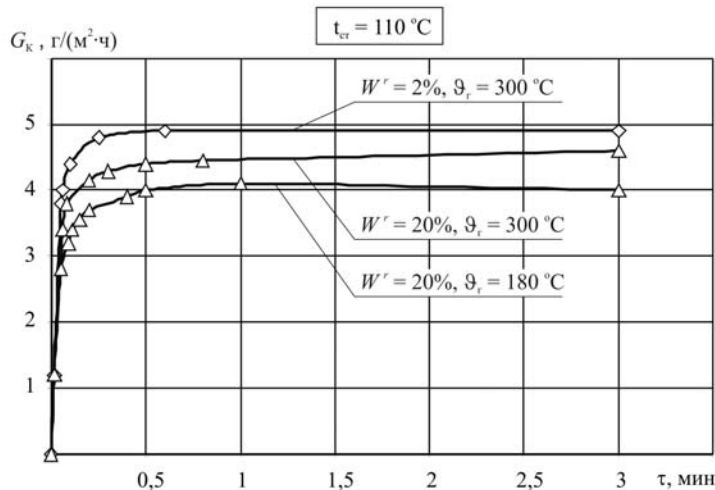


Рис. 4. Зависимость количества сконденсировавшейся кислоты от времени образования при сжигании мазута М40 $S^r = 1,5\%$, $W^r = 20\%$, $\alpha = 1,35$ при $t_{cr} = 110\text{ °C}$ (в районе “сернокислотного пика”)

На основании полученных зависимостей (аналогичных рис. 4) в интервале температур стенки от 50 до 130 °С построены кривые $\Delta G_k = f(t_{cr})$, при разных температурах газов, представленные на рис. 5, которые показывают, что при температуре газов 180 °С наблюдается появление “максимума” массопереноса из-за пересыщения паров при $t_{cr} = 80...100\text{ °C}$. Массоперенос кислоты увеличивается с ростом температуры дымовых газов.

Была проведена серия косвенных измерений массопереноса кислоты и загрязнения с помощью емкостного датчика [15]. На основании результатов измерений были построены изотермы емкости при осаждении золовых и сажистых частиц и конденсации паров кислот при наличии отложений на поверхности датчика (рис. 6). При чистой поверхности датчика (первое измерение) емкость растет мгновенно, вследствие конденсации кислоты и отсутствия адсорбционных про-

цесов. Последующие измерения показали, что из-за отложений, появления процессов адсорбции при последующем дополнительном осаждении

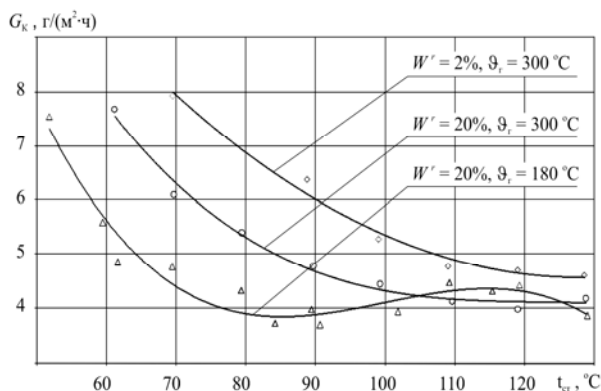


Рис. 5. Зависимость интенсивности образования сконденсировавшейся на поверхности кислоты от t_{ct}

Проведенные исследования подтвердили, что максимум массопереноса наблюдается в области “кислотного пика” при $t_{ct} = 110\text{ °C}$ (рис. 6).

Кислота вступает в реакцию с металлом, вследствие чего относительное содержание кислоты в отложениях уменьшается. Количество компонентов, образующихся в результате действия кислоты (продукты коррозии) увеличивается. В отложениях появляются сульфаты железа, что приводит к повышению их плотности.

В [16] изложен механизм интенсивности образования загрязнений, состоящий из процессов массопереноса паров H_2SO_4 , отложений на пленке кислоты, низкотемпературной коррозии и

золовых и сажистых частиц емкость (а значит и массоперенос) в начальный период времени протекает с запаздыванием.

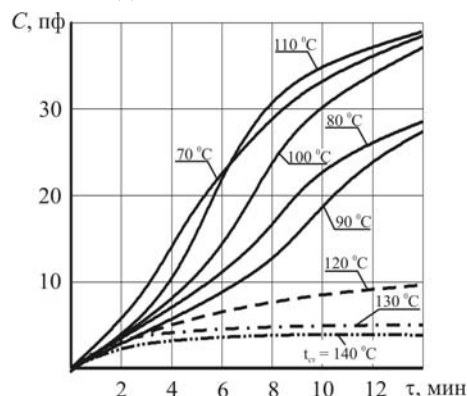


Рис. 6. График зависимости изменения температуры конденсационной поверхности и емкости в процессе измерений

образования соответствующего количества сульфатов. Экспериментальные исследования показали, что сначала на поверхности (практически мгновенно) образуется пленка кислоты, на которую налипают за счет сил адгезии и термофореза твердые частицы из газового потока, затем начинается процесс низкотемпературной коррозии с образованием на поверхности слоя сульфатов. Суммирование массопотока оставшейся H_2SO_4 , отложений и продуктов коррозии (сульфатов) определяет интенсивность загрязнения. В качестве примера рассмотрен процесс для одного из режимов экспериментального исследования в интервале от 0 до 12 ч, представленный на рис. 7.

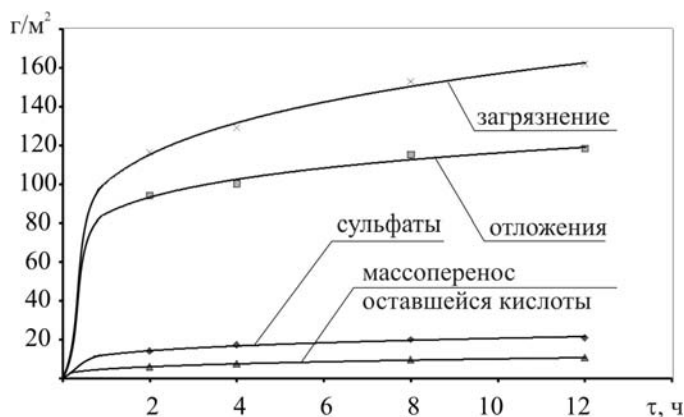


Рис. 7. Развитие процессов загрязнений на низкотемпературной поверхности нагрева для режима сжигания ВМЭ на основе мазута марки М40 ($W^r = 15\%$, $S^r = 1,8\%$, $\alpha = 1,20$)

Количество золовых и сажистых частиц, находящихся в потоке дымовых газов оценивалось путем определения их содержания на стеклотканевом фильтре [16]. Разница между этим количеством твердых частиц (зола и сажа) и осадившимся и будет характеризовать количество выброса золовых и сажистых частиц в атмосферу.

Выводы. Проведенные проверочные 100-часовые опыты подтверждают достоверность

полученных регрессионных уравнений, прогнозирующих процесс развития загрязнения низкотемпературных поверхностей нагрева при температуре стенки ниже температуры точки росы паров серной кислоты ($t_{ct} < t_p^{H_2SO_4}$) при сжигании водомазутной эмульсии. На основании регрессионных уравнений представляется возможным прогноз толщин загрязнения и расчета аэродинамических сопротивлений, а ТАКЖЕ периодичности

очистки низкотемпературных поверхностей нагрева. С увеличением содержания воды в водомазутной эмульсии до 30 % масса загрязнений меньше, вследствие снижения скорости коррозии, так как масса продуктов коррозии составляет меньшую часть массы загрязнений по сравнению с массопотоком оставшейся кислоты. Влияние содержания серы в топливе на интенсивность загрязнения меньше влияния содержания воды в водомазутной эмульсии. Результаты проведенных исследований подтверждают, что с увеличением температуры газов увеличивается и массо-

перенос кислоты. При сжигании ВМЭ, также как и при сжигании стандартного топлива, наблюдается максимум интенсивности массопереноса в области “сернокислотного пика”. Увеличение количества осажившихся твердых частиц золы и сажи дает возможность оценить уменьшение их выбросов в атмосферу, оценить комплексную эффективность работы котлов с точки зрения аэродинамического сопротивления, теплопередачи и температуры уходящих газов, а также эффективности защиты окружающей среды от этих выбросов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Магадеев В.Ш. Коррозия газового тракта котельных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 272 с.
2. Внуков А.К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
3. Гаврилов А.Ф. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
4. Отс А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.
5. Холл Р.Е. Уменьшение загрязняющих выбросов и повышение к.п.д. промышленных котлов при сжигании водотопливных эмульсий. – Тр. американского общества инженеров-механиков: Энергетические машины и установки, 1976. – Т. 98, вып. 28.
6. Горохов В.А. Расчет загрязнения и коррозии трубчатых поверхностей нагрева котельных агрегатов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – № 5-6.
7. Синайский Н.А., Гошей Т.А. Использование метода тяжелой кавитации для сжигания мазута и орэмульсии // Теплоэнергетика. – 2003. – № 5. – С. 76-80.
8. Тув И.А. Сжигание обводненных мазутов в судовых котлах. – Л.: Судостроение, 1968. – 196 с.
9. Горячкин В.Ю., Судиловский В.В., Яновский С.А. Исследование динамики загрязнений и низкотемпературной коррозии поверхности нагрева в потоке дымовых газов // ЦНИИ “Румб” Вопросы судостроения: Промышленная энергетика, охрана окружающей среды и энергоснабжение судов, 1980, вып. 5.
10. Цирульников Л.М., Абдуллаев К.М., Горохов В.А. К вопросу прогнозирования загрязнения некорродирующих низкотемпературных поверхностей нагрева парогенераторов при сжигании сернистого мазута // Изв. ВУЗов: Энергетика. 1978. – № 5.
11. Романов В.А., Дмитриев Г.И., Щербинкин В.Н. Загрязнение низкотемпературных поверхностей нагрева судового парогенератора и эффективность некоторых методов очистки. – Труды ЛКИ, 1978.
12. Stein S., Taylor B.G.S., Wage G.R. Techniques employed in study of the properties of flue gases from large oil-fired boilers. – I. of the Inst. Fuel, 1961, v. 34.
13. Ширчиков Н.М. Влияние времени на скорость роста обложений при сжигании назаровского угля. Красноярский политехнический институт. // Сб. науч. трудов теплоэнергетического факультета. Процессы сжигания канско-ачинских углей. Ч. 1. Красноярск, 1970. – 106 с.
14. Балакирев В.С. и др. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
15. Патент Украины № u 2006 10934. Датчик точки росы, массопереносу / Горячкин В.Ю., Горячкин А.В., Акимов О.В.
16. Акимов А.В. Загрязнение поверхностей нагрева котлов и экологические показатели при сжигании водотопливной эмульсии // Наук. праці. Науково-методичний журнал. Техногенна безпека. – Миколаїв: вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2007. – Т. 73, вип. 60. – С.116-125.

Стаття надійшла до редакції 10.12.2008 р.