

КОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

Докт. техн. наук, проф. СТРИХА И. И.

*Научно-исследовательское и проектное республиканское
унитарное предприятие «БЕЛТЭИ»*

При сжигании водомазутных эмульсий (ВМЭ) в энергетических котлах с присадкой к мазуту дополнительной воды снижается их экономичность, улучшаются экологические показатели. За счет затрат теплоты на испарение 1 % дополнительно вводимой воды КПД котла обычно снижается на 0,05...0,06 %. Одновременно сокращаются выбросы оксидов азота на 15...20 % при влажности ВМЭ до 10 %. Для ряда конструкций котлов (в основном промышленных котельных) обеспечивается совершенствование процесса горения (уменьшаются критические избытки воздуха, ускоряется выгорание коксового остатка мазутов – карбонатов, асфальтенов, смол и т. п.) [1–3].

Эффективность использования в качестве топлива ВМЭ с естественным и (или) искусственным обводнением в большинстве работ, как правило, представлена результатами экспериментальных исследований изменения экономических и экологических показателей работы котлов. Коррозионные свойства продуктов сгорания ВМЭ с различной степенью обводненности практически не рассматривались. В то же время при сжигании ВМЭ изменяются его расход и состав горючей массы, объем продуктов сгорания и их коррозионные свойства из-за роста парциального давления водяных паров и изменения содержания в дымовых газах серного ангидрида SO_2 . Концентрация SO_2 в продуктах сгорания мазута или ВМЭ зависит, в первую очередь, от режимов их сжигания и процессов выгорания и охлаждения факела. Это должно сказываться на состоянии материалов воздухоподогревателей, внешних газоходов и дымовых труб.

При сжигании мазута или ВМЭ в продуктах сгорания содержатся различные токсичные вещества, выход которых зависит от режимов горения топлива и взаимосвязи их между собой и некоторыми несгоревшими компонентами (например, коксовыми частицами) или образующимися промежуточными соединениями. Поэтому избирательное воздействие присадки воды к мазуту на коррозионные свойства продуктов сгорания в чистом виде установить весьма затруднительно. Представляется возможным дать качественную оценку суммарных эффектов и обусловленных изменений в процессах горения ВМЭ и коррозионных свойств продуктов их сгорания.

При рассмотрении теплохимических и энергетических последствий сжигания ВМЭ принят сернистый мазут с $Q_n^p = 9490$ ккал/кг; $S^p = 1,4$; $W^p = 3$ %. Параметры состояния продуктов сгорания определялись с учетом снижения экономичности работы котлов в зависимости от степени обводненности мазутов с обеспечением одинаковой теплопроизводительности котлов.

Для определения значений объема дымовых газов и воздуха при сжигании ВМЭ с разной влажностью W_2^p применялся коэффициент K

$$K = \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p}. \quad (1)$$

Теплотворная способность ВМЭ с разной степенью обводненности определялась по выражению

$$Q_n^p = (Q_{н1}^p + 6W_1^p) \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} - 6W_2^p, \text{ ккал/кг.} \quad (2)$$

Объемы дымовых газов, воздуха, водяных паров и их парциальные давления устанавливались как при сжигании 1 кг ВМЭ, так и 1 кг мазута с присадкой соответствующего количества воды.

В связи с вводом дополнительного количества воды в мазут при его сжигании объем водяных паров растет, увеличивается их парциальное давление. Изменение объема водяных паров определено по формуле

$$\Delta W^p = \frac{100d}{1 + d}, \%, \quad (3)$$

где d – присадка воды к мазуту, кг/кг.

Прирост объема водяных паров рассчитан по выражению

$$\Delta V_{H_2O} = \frac{d}{\rho} = 1,245d, \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (4)$$

Объем дымовых газов для мазута с добавкой воды (приведен к $\alpha = 1,4$) возрастает за счет прироста объема водяных паров и определяется по формуле

$$V_r = V_r^0 + \Delta V_{H_2O} + 1,0161(\alpha - 1)V^0, \text{ м}^3/\text{кг.} \quad (5)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Так, при сжигании одинакового количества мазута и ВМЭ по мере роста влажности объем дымовых газов и воздуха снижается. В то же время уменьшается теплотворная способность топлива. Для обеспечения требуемой теплопроизводительности котлов соответственно растет расход ВМЭ.

Вследствие роста парциального давления водяных паров в дымовых газах увеличивается температура их точки росы. При обводнении мазута с 3 до 10 % температура точки росы водяных паров хоть и увеличивается на 2,5 °С, но в реальных условиях практически не сказывается на эксплуатационном состоянии котлов. В то же время рост объема водяных паров в дымовых газах обуславливает повышение температуры насыщения паров серной кислоты.

Отдельные параметры мазута и ВМЭ, дымовых газов
и воздуха при разной влажности топлива

Показатель	Присадка воды к мазуту d , г/кг				
	0	20,41	75,26	136,36	204,81
Q_n^p , ккал/кг	9490	9280	8760	8240	7720
Влажность, %	3	5	10	15	20
Приращение влажности ΔW^p , %	0	2	7	12	17
Содержание серы S^p , %	1,40	1,37	1,30	1,23	1,16
$V_{г(ВМЭ)}^o$, м ³ /кг	11,28	11,06	10,56	10,03	9,51
$V_{(ВМЭ)}^o$, м ³ /кг	10,45	10,23	9,69	9,15	8,62
$V_{H_2O(ВМЭ)}^o$, м ³ /кг	1,45	1,44	1,43	1,42	1,41
$\Delta V_{H_2O(маз)}$, м ³ /кг	0	0,025	0,094	0,170	0,255
$V_{H_2O(маз)}$, м ³ /кг	1,450	1,465	1,524	1,594	1,665
$V_{г(маз)}^{прив} - \alpha = 1,4$, м ³ /кг	15,530	15,555	15,624	15,700	15,785
r_{H_2O} , ат	0,093	0,094	0,098	0,102	0,105
Δr_{H_2O} , %	0	1,08	5,38	9,68	12,90
$t_p^{вп}$, °С	44,6	44,8	45,6	46,4	46,9

Рост объема продуктов сгорания топлива вызывает увеличение сопротивления газового тракта, а соответственно и расхода электроэнергии на тягодутьевые установки. Это относится, в первую очередь, к энергетическим котлам, в которых процесс горения организован с относительно низким избытком воздуха в топке ($\alpha = 1,03 \dots 1,05$). В это время в котельных установках небольшой мощности промышленных предприятий избыток воздуха при сжигании неэмульгированного мазута составляет, как правило, $\alpha = 1,1 \dots 1,15$, что создает предпосылки для его сокращения за счет сжигания ВМЭ. Это приводит к снижению затрат электроэнергии на тягу и дутье, т. е. к определенному увеличению КПД котла, которое должно превосходить затраты теплоты на испарение и удаление дополнительной влаги [1, 4].

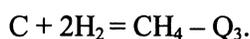
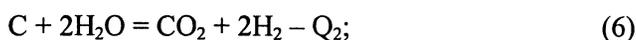
Механизм горения ВМЭ с различной влажностью, а также образования серного ангидрида, вызывающего низкотемпературную коррозию, в литературе рассмотрен недостаточно полно. Это в известной мере сдерживает широкое использование ВМЭ в энергетике и промышленности.

Процесс горения жидкого топлива в котлах происходит в среднетемпературной области (1000...1800 °С) и характеризуется многостадийностью протекания в пределах топочных устройств. В любых условиях сжигание мазута осуществляется при определенной влажности. Влага в зону горения поступает с мазутом при паровом или паромеханическом распыле мазута, а также с воздухом. Однако дополнительное обводнение мазута существенно влияет на процесс сжигания, происходит изменение характеристик факела.

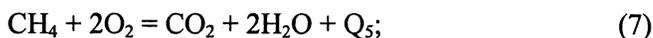
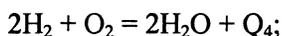
Основными стадиями процесса сжигания жидкого топлива являются испарение и пирогенетическое разложение углеводородистых соединений. От соотношения времени протекания и степени завершенности этих стадий зависят суммарный эффект выгорания топлива и количество образующегося при этом серного ангидрида.

Лимитирующая стадия процесса горения мазута – его испарение. При сжигании обводненного мазута в эмульгированном состоянии скорость горения сопоставима со скоростью испарения. Более полный переход жидкого топлива в парообразное состояние обеспечивается улучшением условий распыливания мелкодисперсных капель мазута, содержащих воду. При уменьшении размера капли и увеличении отношения поверхности к объему капли возрастают величина поверхностного натяжения и давление паров воды внутри капли, что приводит к микровзрыву и их испарению, улучшению результатов смесеобразования и более полному сгоранию в пределах топочной камеры.

При протекании процесса горения окисление углерода водой сопровождается реакциями газификации, которые протекают с поглощением теплоты и упрощенно представлены схемой:



Завершение реакций горения происходит по схеме:



В присутствии водяного пара в зоне горения интенсифицируются стадия газификации топлива и его пирогенетическое разложение. При сжигании эмульгированных обводненных мазутов обеспечиваются достаточно высокая полнота сгорания, скорость распространения пламени с одновременным сокращением расхода окислителя воздуха. Важное значение имеют размер эмульгированных частиц ВМЭ и равномерность их распределения по всей массе поступающего на сжигание топлива. При соответствующем соотношении мазута и воды положительное действие последней перекрывает ее отрицательное влияние как инертного разбавителя горючей смеси. Таким образом, количество воды в мазуте должно быть ограничено и относительно небольшим. При содержании влаги в мазуте более 10 % вода действует как инертный разбавитель горючей смеси, каталитическое ее действие на процесс горения снижается.

Одновременно с образованием продуктов сгорания мазута и ВМЭ происходит превращение имеющихся в них сернистых соединений. Известно, что сера мазута сгорает с образованием сернистого и серного ангидридов. В последний превращается порядка 1 % серы топлива.

Образование серного ангидрида по газовому тракту котла происходит в гомогенной фазе и за счет каталитического окисления части сернистого газа при взаимодействии с отложениями на поверхностях нагрева. Из реакций, характеризующих образование SO_3 в гомогенной зоне, наибольший интерес представляют следующие:



Особенности механизма образования SO_3 в дымовых газах котлов обстоятельно рассмотрены в [5, 6]. Определяющими параметрами топочного процесса, влияющими на выход SO_3 , являются исходное содержание сернистого газа, уровень температуры факела и наличие кислорода в зоне горения. Присутствие в дымовых газах твердых частиц углерода также оказывает существенное влияние на процесс образования SO_3 . Сажа, коксовые частицы поглощают избыточную энергию молекул активированной двуокиси углерода и атомов кислорода, что приводит к снижению содержания атомарного кислорода, в результате чего суммарный выход SO_3 сокращается.

В начальной стадии окисления углеводородов в присутствии водяных паров температура в ядре факела повышается, стимулируя рост тепловыделения в реагирующей системе и приводя к снижению энергии активации смеси и увеличению выхода SO_3 . Затем часть тепловыделения расходуется на испарение воды и температура факела уменьшается, что влечет суммарное снижение интенсивности процесса образования SO_3 , который зависит от времени окисления углеводородов.

В энергетических котлах, как уже отмечалось, избытки воздуха изменяются в узких пределах, поэтому определяющее влияние на выход SO_3 оказывает тепловое напряжение топочного объема, которое меняется при преднамеренном охлаждении факела либо изменении нагрузки котлов. Несмотря на то, что при снижении нагрузки котлов избыток воздуха в топочных камерах обычно возрастает, содержание SO_3 в продуктах сгорания топлива при пониженных нагрузках котлов сокращается, приводя к уменьшению коррозионной активности дымовых газов в низкотемпературной зоне газового тракта котельных установок.

Тепловая эффективность работы воздухоподогревателей в значительной степени зависит от состояния их загрязнения отложениями, оседающими на поверхностях нагрева из продуктов сгорания топлива, а также образующимися в результате протекания процессов низкотемпературной коррозии.

При обводнении мазута сточной или технической водой в продуктах сгорания ВМЭ могут образовываться дополнительные солевые соедине-

ния, которые способны оседать на поверхности нагрева воздухоподогревателей и газоходов, а это приведет к усилению процессов низкотемпературной коррозии. Количество отложений солевых соединений на поверхности стенок газоходов зависит от полноты сгорания топлива, дисперсности этих соединений. При снижении количества коксовых частиц за счет относительно высокой степени завершенности их пирогенетического разложения в пределах топочной камеры вероятность их выноса в газоходы снижается. Однако известно, что при одинаковых или даже при более низких потоках конденсации паров серной кислоты из дымовых газов на поверхность без отложений процессы низкотемпературной коррозии могут усиливаться. Это связано со снижением ингибирующих свойств отложений и сокращением их количества на поверхности газоходов.

Скорость коррозии поверхностей нагрева воздухоподогревателей и внешних газоходов зависит от величины потоков конденсации серной кислоты из дымовых газов на поверхность, значения которых зависят от соотношения температур дымовых газов и поверхности, а также температуры насыщения паров серной кислоты (кислотной точки росы).

Относительное изменение потоков серной кислоты при сжигании обводненного мазута в виде эмульсий может быть представлено выражением

$$\bar{j} = \bar{\beta} \Delta \bar{\pi}, \quad (9)$$

где $\bar{\beta}$ и $\Delta \bar{\pi}$ – соответственно относительное изменение коэффициента массопереноса и модуля движущейся силы переноса.

После несложных преобразований это выражение принимает вид

$$\bar{j} = \bar{K}_t \frac{\bar{W}^{0,83} p_{r2} - p_{cr2}}{\bar{d}^{0,17} p_{r1} - p_{cr}}, \quad (10)$$

где \bar{W} и \bar{d} – соответственно относительное изменение скорости дымовых газов и живого сечения для их прохода; p_{r2} и p_{cr2} – парциальные давления паров серной кислоты в дымовых газах и на поверхности стенки; \bar{K}_t – поправочный коэффициент, учитывающий температуру и состав дымовых газов.

Значение этого коэффициента с ростом температуры дымовых газов снижается. При повышении температуры дымовых газов с 160 °С до 180 °С K_t уменьшается примерно на 4 %.

Анализ выражения (10) показывает, что при дополнительном обводнении мазута, росте объема дымовых газов и повышении загрязнения отложениями поверхности коэффициент массопереноса β в воздухоподогревателях увеличивается относительно больше, чем в дымовых трубах. При сопоставимых температурах дымовых газов с добавкой воды к мазуту растет парциальное давление водяных паров и паров серной кислоты (в пересчете на «сухой» мазут), модуль переноса $\Delta \pi$ увеличивается. Вследствие этого возрастают и потоки конденсации серной кислоты на поверхность.

Результаты определения значений потоков конденсации на поверхность футеровки железобетонной дымовой трубы ($H = 150$ м; $d_y = 5,7$ м) для некоторых режимов ее работы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения потоков конденсации серной кислоты на поверхность футеровки при сжигании мазута и ВМЭ, кг/ч

Показатель	Содержание влаги, %				
	3 (мазут)	5	10	15	20
$W_y = 7,9$ м/с					
$t_{нв} = 5$ °С	1,505	1,543	1,582	1,610	1,635
$t_{нв} = -20$ °С	1,668	1,705	1,742	1,766	1,788
$W_y = 15,8$ м/с					
$t_{нв} = -20$ °С	0,919	0,960	1,023	1,030	1,060

Рассматривались режимы работы дымовой трубы при температуре отводимых газов $t_r = 150$ °С и температуре наружного воздуха $t_{нв} = 5$ °С и -20 °С. Как следует из результатов, в сопоставимых условиях при скорости дымовых газов в устье трубы $W_y = 7,9$ м/с значения потоков конденсации серной кислоты на поверхность футеровки превышают таковые при $W_y = 15,8$ м/с. Это связано с более существенным понижением температуры стенки футеровки, а соответственно и парциального давления паров серной кислоты на ее поверхности, чем это происходит при повышенном объеме отводимых газов. Приведенные значения потоков серной кислоты на поверхность футеровки подтверждают рост коррозионной активности продуктов сгорания ВМЭ по мере увеличения обводненности мазутов.

Температурный режим футеровки большинства конструкций дымовых труб практически однозначно зависит от температуры наружного воздуха и отводимых газов. Для дымовых труб характерным является процесс проникновения агрессивных отводимых газов через неплотности футеровки с одновременной конденсацией паров кислоты и воды, проникновением конденсата через несущий ствол на наружную поверхность из-за естественной проницаемости рабочих швов, наличия усадочных трещин и т. п. При повышенном содержании в отводимых газах водяных паров вероятность увлажнения материалов футеровки и несущего ствола повышается, что стимулирует развитие в них сульфатной коррозии. Вследствие этого надежность работы дымовых труб и газоходов снижается. Учитывая изменение тепловлажностного режима дымовых труб по их высоте, в отдельных зонах возникают повреждения, непосредственно связанные с отводом продуктов сгорания обводненных мазутов.

Дополнительное (преднамеренное) обводнение мазутов с приведением их в состояние ВМЭ для энергетических котлов современных конструкций ведет к повышению коррозионной активности дымовых газов, относительному усилению процессов низкотемпературной коррозии и снижению экономичности котлов. В то же время сжигание естественно обводненных мазутов в виде ВМЭ позволяет улучшить экологические показатели котлов без снижения показателей их экономичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лозицкий Н. Г., Котлер В. Р. Использование горелок с ротационной форсункой для сжигания мазута с присадкой воды // Промышленная энергетика, – 2002. – № 3. – С. 37–40.
2. Стриха И. И., Селедцов В. А., Мартынов Ю. Н. Эколого-экономическая эффективность сжигания водомазутных эмульсий в энергетических котлах // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 9–10. – С. 67–72.
3. Ведрученко В. Р., Крайнов В. В., Кокшаров М. В. О влиянии коэффициента избытка воздуха и нагрузки котельных установок на их экономичность при сжигании разных видов топлива // Промышленная энергетика. – 2002. – № 3. – С. 24–28.
4. Ту в И. А. Сжигание обводненных мазутов в судовых котлах. – Л.: Судостроение, 1968. – 196 с.
5. Внуков А. К. Теплохимические процессы в газовом тракте паровых котлов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
6. Белосельский Б. С. Топочные мазуты. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.

Представлена научным семинаром
лаборатории топлива и топочных процессов

Поступила 11.09.2002

УДК 53.088

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКИХ ГЛИНИСТЫХ ОБРАЗЦОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ФОРМОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

ИВАНОВСКИЙ И. К.

РУП «Минский завод строительных материалов»

С усилением конкурентной борьбы за место на рынке строительной керамики пластического формования как никогда актуальной становится проблема повышения качества продукции. При производстве строительной керамики пластического формования качество продукции закладывается в самом начале процесса: составление шихты, обработка массы и ее формование, а также сушка сырых изделий. В случае неправильного выбора технологического режима обработки формовочной массы и сушки сырых изделий последние в процессе сушки могут трескаться и деформироваться, что приводит к браку и снижению качества готовой продукции.

На протяжении XX в. неоднократно предпринимались попытки разработать методику оценки в лабораторных условиях сушильных свойств формовочных масс. Наиболее перспективными и удобными являются методики, основанные на использовании для нагрева образцов керамических масс тепловых потоков от различных источников в основном инфракрасного излучения.