

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ СЖИГАНИЯ МАЗУТА
ПРИ КОЭФФИЦИЕНТАХ ИЗБЫТКА ОКИСЛИТЕЛЯ,
МЕНЬШИХ ЕДИНИЦЫ

УДК 536.46:533.6+534.222.2

Г. Н. Волчкова, П. А. Егоянц, В. К. Иконников,
А. И. Кузьмин, С. С. Харченко

РНЦ «Прикладная химия», 197198 Санкт-Петербург

Предложена математическая модель исследуемого процесса, в которой капли мазута моделируются каплями углеродной суспензии. Горение и пиролиз паров жидкой части горючего рассматривались в диффузионном приближении. При моделировании горения углеродных частиц учитывались диффузионные и кинетические процессы. Проведенные расчетные и экспериментальные исследования выявили определяющее влияние на полноту сгорания мазута процессов сажеобразования при его пиролизе и излучения образующихся частиц сажи. Предложен и реализован способ сжигания мазута с пониженным сажеобразованием.

В ряде металлургических производств получение металлов основано на проведении высокотемпературного восстановительного процесса с использованием CO и H₂. Один из экономичных способов создания больших количеств горячего восстановительного газа — сжигание мазута при низких коэффициентах избытка окислителя α . Однако этот процесс сопровождается интенсивным сажеобразованием и приводит к сильному загрязнению окружающей среды. Анализ процессов и рекомендации по сжиганию мазута при $\alpha < 1$ в литературе практически отсутствуют.

Цель данной работы — анализ процессов горения мазута с воздухом при $\alpha < 1$ и разработка способа сжигания мазута с пониженным сажеобразованием.

Мазут как углеводородное горючее обладает рядом специфических свойств. Рассматриваемое горючее очень вязкое ($\mu > 300$ сСт при $T = 293$ К). Для уменьшения диаметра каплей, получающихся при распыле, топливо обычно подогревают. Топочные мазуты представляют собой смесь углеводородов с различными молекулярными массами, вследствие чего разброс в температурах кипения фракций составляет ~ 300 К. Содержание углерода в мазуте ~ 88 % (марка М100). Характерной особенностью горения мазута является образование на последней стадии его выгорания коксового остатка, составляющего $3 \div 12$ % начальной массы [1–3] и состоящего в основном из углерода. Температура коксообразования лежит внутри температурного диапазона испарения фракций мазута.

В работе [3] приведены следующие детали развития процесса горения мазута. Сначала из капли испаряются летучие компоненты, в результате на поверхности капли образуется вязкая оболочка, состоящая из остатков асфальтенов и смол. По мере повышения температуры внутри капли происходят испарение и накопление новых летучих компонентов; размеры капли увеличиваются и пары вырываются наружу. Затем под действием поверхностного натяжения оболочка стягивается, и к моменту завершения процесса испа-

мазут
mazut
fuel oil

рения остается полая сфера (ценосфера) — коксовый остаток. Ценосферы представляют собой частицы с одной или несколькими полостями внутри, размеры полостей составляют 10 ÷ 50 % диаметра частицы. Отношение наружного диаметра частицы к внутреннему 1,3–1,4. Материал ценосфер имеет пористую структуру, средний диаметр пор 2,5 мкм, соответствующая этому диаметру удельная поверхность составляет 1,8 м²/г, пористость ~ 80 %.

Обычно в котельных установках для распыливания мазута используют водяной пар под давлением не менее 1 МПа. Но при сжигании мазута с целью получения восстановительного газа это неприемлемо из-за отрицательного влияния воды на восстановительный потенциал. Поэтому для распыливания мазута на металлургических заводах используются простые форсунки струйного и центробежного типов с высоко- и низконапорным воздухом, дающие большой размер каплей (~ 10⁻⁴ м). Оценки, проведенные в соответствии с данными работы [4], показали, что в этих условиях капли горят индивидуально, что также согласуется с результатами работы [5]. В [6] установлено, что при горении совокупности каплей в диффузионном режиме для сценки с хорошей точностью можно использовать модель индивидуального горения капли.

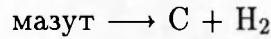
Для определения состава и температуры продуктов сгорания мазута были проведены термодинамические расчеты, которые показали, что активное сажеобразование начинается при $\alpha < 0,4$. Следовательно, для горючей смеси должно выполняться условие $\alpha > 0,4$ во всем пространстве горения (т. е. смесь должна быть хорошо перемешанной).

Были выполнены эксперименты по сжиганию мазута (подробности см. ниже) при небольших временах пуска (до 10 мин). Измеренное содержание сажи в продуктах сгорания оказалось очень высоким. Чтобы разобраться в полученных результатах и определить возможность сжигания мазута при низких α , были проведены расчетные исследования по изложенной ниже модели.

ОДНОМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ МАЗУТА

Предполагается, что объемное содержание конденсированной фазы мало. Конденсированная фаза описывается как сплошная среда с использованием модели вложенных континуумов. Такое приближение допустимо, когда отношение характерного макромасштаба к размеру частиц превышает величину $(2\delta^2\gamma_p)^{-1/3}$ [7], где γ_p — объемная доля, а δ — относительная флуктуация распределенной плотности конденсированной фазы. Оценки показывают, что в данном случае это условие выполняется по крайней мере при $\delta \geq 10^{-4}$. Приняты также следующие допущения: течение квазиодномерное, т. е. параметры среды осреднены по поперечному сечению канала; газ невязкий, вязкость и теплопроводность учитываются только при взаимодействии фаз; объемное содержание конденсированной фазы мало. Газовая среда считается оптически тонкой для излучения частиц; излучение газовой фазы не учитывается. Температура внутри и на поверхности углеродных агломератов одинакова. Частицы сферические, не взаимодействуют между собой, горение их происходит индивидуально. Капли горючего рассматриваются как капли углеродной суспензии, в которых твердый углерод моделирует коксовый остаток, образующийся при горении мазута. Содержание коксового остатка задается по имеющимся в литературе данным. Предполагалось, что сначала идут испарение и горение жидкой фазы при $\alpha = 1$, а затем после выгорания кислорода начинаются пиролиз жидкости с образованием сажи и горение твердой фазы

двух типов: сажных частиц и коксового остатка, отличающихся между собой по пористости и размерам. Предполагается, что горение и пиролиз жидкой части «суспензии» идут с бесконечной скоростью и определяются тепло- и массообменными процессами (диффузионный режим), пиролиз происходит по простейшей схеме



с поглощением тепла. Состав газовой фазы предполагается термодинамически равновесным. Горение твердых частиц рассматривается с учетом массообменных процессов в газе и кинетических процессов на поверхности частиц. Так как коксовый остаток состоит в основном из углерода, для описания его свойств используются свойства сажи, хотя в состав коксового остатка помимо углерода входят и другие элементы [3, 8].

С учетом вышеперечисленных предположений можно записать

- уравнения баланса массы, импульса для газовой фазы:

$$\frac{d}{dx}(\rho u) = \sum_i \alpha_i \chi_i, \quad \frac{d}{dx}(\rho u^2) = -\frac{dp}{dx} + \sum_i (\alpha_i \chi_i u_i + F_i);$$

- уравнение для полной энергии системы газ — частицы (капли):

$$\frac{d}{dx}(\rho u E) = -Q_\sigma - q;$$

- уравнения для континуума капель мазута:

$$\frac{d}{dx}(\rho_m u_m) = -\alpha_m, \quad \frac{d}{dx}(\rho_m u_m^2) = -F_m - \alpha_m u_m, \quad \frac{d}{dx}(\rho_m u_m h_m) = -E_m - Q_m;$$

- уравнения для континуума частиц сажи:

$$\frac{d}{dx}(\rho_C u_C) = -\alpha_C + \alpha_m(1 - \chi_m), \quad \frac{d}{dx}(\rho_C u_C^2) = -F_C - \alpha_C u_C + \alpha_m(1 - \chi_m)u_m,$$

$$\frac{d}{dx}(\rho_C u_C h_C) = -E_C - Q_C + Q_p(1 - \chi_m) - Q_\sigma;$$

- уравнение состояния газовой фазы:

$$p/\rho = RT/m;$$

- уравнения баланса химических элементов в газовой фазе:

$$\frac{d}{dx}(\rho u C_{O,N}) = 0, \quad \frac{d}{dx}(\rho u C_H) = \alpha_m \chi_m, \quad C_C = 1 - C_N - C_O - C_H,$$

$$\chi_i = \begin{cases} 1, & \text{если нет жидкой фазы,} \\ \chi_m, & \text{если есть пиролиз или горение жидкой фазы.} \end{cases}$$

velocity

Здесь χ_m — коэффициент массового содержания водорода в жидком горючем; C_C , C_N , C_O , C_H — массовые концентрации химических элементов C, N, O, H; ρ — плотность; u — скорость; h — энтальпия; q — источниковое слагаемое, выражающее конвективный теплообмен со стенками; m — молекулярный вес. Индекс i относится к i -й фазе (м — мазут, C — сажа). Межфазное взаимодействие (газ — частица) определяется источниками слагаемыми α_i , F_i , E_i , Q_i , Q_σ , Q_p (E — энергия, F_i — сила межфазного трения, Q_i — контактный теплообмен, Q_σ — излучение твердых частиц, Q_p — теплота пиролиза). Подробности математической модели можно найти в [9].

Слагаемое, выражающее массообмен, записывается следующим образом [10]:

— для жидкости

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & \text{при } T_p < T_b, \\ \pi N \frac{\lambda \text{Nu} D}{c_p} \ln(1 + B) & \text{при } T_p = T_b, \end{cases}$$

— для твердой частицы

$$\alpha_i = \pi N D_p^2 \sum_j K_j^C,$$

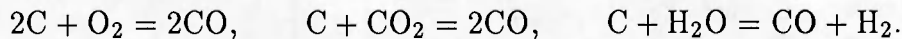
где N — число частиц в единице объема, T_p , D_p — температура и диаметр частицы, T_b — температура кипения, B — «действующая сила» массообмена, K_j^C — скорость реакции.

Излучение твердых частиц Q_σ вычисляется на основе закона Стефана — Больцмана. Межфазный обмен энергией записывается следующим образом:

$$E_C = \sum_j \dot{\omega}_j h_j - \alpha_C h_C, \quad E_M = \alpha_M L,$$

где L — теплота испарения.

Предполагается, что на поверхности углерода происходят следующие химические реакции [11]:



Для нахождения неизвестных концентраций на поверхности твердых частиц использован подход [11], в котором учитываются диффузия и гетерогенные реакции.

Для учета внутреннего реагирования в углеродных частицах применяется метод [12].

Переносные свойства газовой смеси рассчитываются по формулам Уилки и Мэйсона — Саксена.

Для учета конвективного теплообмена со стенками использовали закон Ньютона для теплообмена и критериальные зависимости для развитого течения в трубе:

$$q = 4\alpha_T(T - T_w)/d, \quad \alpha_T = \text{Nu}\lambda/d.$$

Здесь

$$\text{Nu} = \begin{cases} 3,65 & \text{при } \text{Re} \leq 2300, \\ 0,018\text{Re}^{0,8} & \text{при } \text{Re} > 2300, \end{cases}$$

α_T — коэффициент теплообмена, d — диаметр канала.

Алгоритм расчета пиролиза строился следующим образом. В начальном сечении определяется расход жидкой фазы, который может сгореть при $\alpha = 1$, исходя из известного расхода кислорода. После того как данное количество жидкости выгорело, предполагается, что оставшаяся жидкость продолжает испаряться, полностью пиролизируется в газовой фазе и в смеси образуется еще одна фракция — сажа, которая до этого момента отсутствовала в потоке.

Процесс сажеобразования весьма сложен, включает в себя большое количество реакций и приводит к образованию полидисперсного потока сажи. В настоящее время этот процесс не имеет достаточно простого математического описания, универсального для различных горючих. Поэтому в данной работе принята следующая упрощенная схема расчета сажеобразования. Общее количество образующейся сажи рассчитывается исходя из расхода жидкой части горючего, оставшегося после горения с $\alpha = 1$. Из экспериментов

известно, что в рассматриваемых процессах размеры образовавшихся сажевых частиц не превышают 0,3 мкм. Поэтому в расчете задавался предельно возможный размер частиц, равный 0,3 мкм. По нему из известного расхода сажи определялось количество частиц, которое далее не изменялось. Затем по плотности частиц, рассчитываемой из приведенного выше уравнения, и их количеству находился размер частиц. Отметим, что за счет выгорания частицы сажи не достигают предельного значения диаметра.

В начальном сечении задаются скорость, температура, давление и состав газового потока, температура и расход мазута.

Сформулированная система уравнений с замыкающими условиями решалась неявным численным методом, сходимость контролировалась.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В расчетах приняты следующие значения начальных параметров: $p = 10^5$ Па, $u = u_m = 2$ м/с, начальные температуры газа и частиц мазута 405 и 400 К соответственно. В расчетах варьировались коэффициент избытка окислителя, диаметр капель, температура стенки, длина камеры сгорания. В качестве базовых вариантов рассматривались суспензии, содержащие 5 и 10 %-коксового остатка.

Для оценки влияния пористости твердых частиц были проведены расчеты, которые показали, что изменение пористости коксового остатка и образующейся сажи от 0,2 до 0,8 приводит к малому изменению конечной полноты сгорания.

Для демонстрации характерной динамики рассматриваемых процессов на рис. 1 приведены температура, расход частиц сажи и кокса в зависимости от продольной координаты. Типичным является выраженное разделение по пространству процессов: кипение и выгорание в газовой фазе при $\alpha = 1$ занимают ~ 1 см в зависимости от размера капель, затем приблизительно столько же идет пиролиз с одновременным горением образующихся сажевых частиц, далее — прогревание коксового остатка и горение сажевых частиц. При этом температура газа понижается за счет расхода тепла на пиролиз.

Расчеты показали, что увеличение доли коксового остатка, образующегося в мазуте, приводит к малому увеличению полноты сгорания. Это связано с тем, что из-за уменьшения содержания углерода в жидкой части модельного горючего уменьшается сажеобразование в процессе пиролиза. Конвективный теплообмен со стенками не очень существен, он приводит к уменьшению температуры газа на несколько десятков градусов, в то время как наблюдаемое в эксперименте падение температуры на порядок выше.

Основной вклад в теплотери вносит излучение частиц сажи. С увеличением температуры стенки полнота сгорания увеличивается за счет уменьшения потерь энергии вследствие излучения сажистых частиц (рис. 2, по оси абсцисс отложено отношение расхода твердого углерода в текущем сечении к расходу углерода в горючем). После прекращения интенсивного горения сажистые частицы продолжают излучать до тех пор, пока температура среды не сравнивается с температурой стенки.

Для оценки влияния толщины стенки была рассмотрена задача сопряженного теплообмена. Проведены расчеты теплообмена при $\alpha = 0,6$ для стенки с теплоизоляцией из шмота (в качестве исходных данных взяты условия в сечении, где горение сажевых частиц практически прекратилось). При варьировании толщины стенки от 5 до 45 см температура внутренней стенки и газа на выходе изменилась слабо (температура газа увеличилась

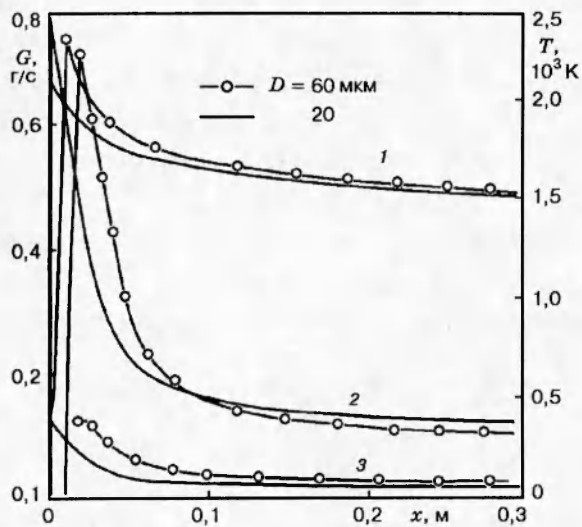


Рис. 1

Рис. 1. Зависимости температуры (1), расходов частиц сажи (2) и кокса (3) от продольной координаты для частиц диаметром 20 и 60 мкм ($\alpha = 0,6$ при содержании коксового остатка 5 %)

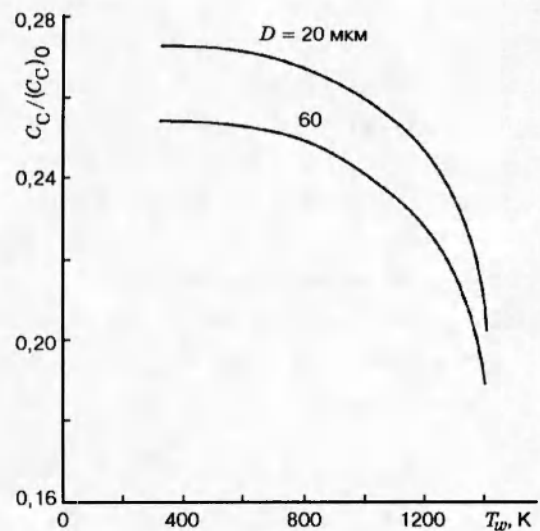


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость полноты сгорания мазута от температуры стенки для частиц диаметром 20 и 60 мкм ($\alpha = 0,6$ при содержании кокса 5 %)

на 20 К), т. е. в стационарном режиме толщина стенки слабо влияет на полноту сгорания. Таким образом, температура стенки оказывает заметное влияние в основном на режимах запуска, до тех пор пока стенка не прогреется до температуры, близкой к температуре газа. В режиме запуска, когда температура стенки существенно ниже температуры газа, излучение сажевых частиц заметно ухудшает режим горения (см. рис. 2).

Проведено исследование влияния начального размера капель мазута на процесс горения при $\alpha = 0,6$ и $0,7$, $T_w = 1000$ и 1400 К. В рамках принятой модели чем крупнее исходная капля мазута, тем дольше она прогревается, тем позже начинается и дольше идет процесс горения (что соответствует существующим экспериментальным данным), а затем и пиролиза. При этом, хотя масса пиролизующегося горючего не зависит от размера исходных капель, поверхность испарения оказывается существенно меньше, вследствие чего уменьшается и скорость сажеобразования (напомним, что пиролиз рассматривается в диффузионном приближении). Так как температура, получающаяся в результате горения при $\alpha = 1$, достаточно велика, образующиеся в процессе пиролиза мелкие частицы сажи быстро прогреваются и успевают частично выгореть еще до окончания пиролиза. Максимум расхода образовавшейся сажи сильно снижается при увеличении размеров капель. Для мелких капель основную часть недогара составляют частицы сажи, для крупных — коксовые частицы. Причем в рассмотренных условиях полнота сгорания увеличивается с ростом размера капель. Необходима экспериментальная проверка данного результата.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что основной причиной падения полноты сгорания мазута при $\alpha < 0,7$ в режиме горения капель (рис. 3) является

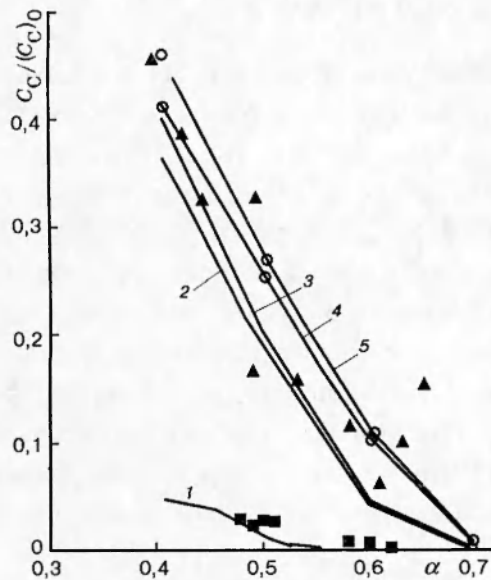


Рис. 3. Зависимость полноты сгорания от коэффициента избытка окислителя:

1 — с испарением, $T_w = 300$ К, 2 — $D = 60$ мкм, $T_w = 1400$ К, 3 — $D = 20$ мкм, $T_w = 1400$ К, 4 — $D = 60$ мкм, $T_w = 300$ К, 5 — $D = 20$ мкм, $T_w = 300$ К; эксперимент: ▲ — НАУСК, ТЕС-СНЕ-2 (без предварительного испарения), ■ — с предварительным испарением; расчет: 1 — без пиролиза, 2-5 — с учетом пиролиза

сажеобразование при пиролизе, приводящее к теплотерям излучением частиц сажи и соответственно к замедлению выгорания сажи и коксового остатка. С точки зрения получения максимального выхода восстановительного газа сжигание при $\alpha > 0,7$ неудовлетворительно.

Рассмотрим другой способ сжигания мазута — предварительное перемешивание его с нагретым воздухом и испарение. Этот вариант позволяет избежать стадии сгорания с $\alpha = 1$, приводящей к полному выгоранию кислорода и пиролизу. Конечно, в действительности при предварительном испарении горючего также будет происходить пиролиз. Но в этом случае имеется свободный кислород и интенсивность пиролиза будет много меньше, чем в случае капельного горения, на последней стадии которого $\alpha \cong 0$.

На рис. 3 приведена зависимость безразмерного расхода твердой фазы (углерода) на выходе из камеры сгорания от коэффициента избытка окислителя для двух предельных случаев:

1) в соответствии с описанной выше моделью горения двухфазной смеси после выгорания мазута при $\alpha = 1$ идет пиролиз,

2) пиролиз отсутствует, идет только горение (что приближенно можно соотнести со случаем предварительного испарения).

Содержание коксового остатка принято 5 %, диаметр капель 20 и 60 мм при $T_w = 300$ и 1400 К. Полнота сгорания горючей смеси в режиме предварительного испарения лимитируется выгоранием коксового остатка. Как видно из рисунка, для двухфазной смеси (в рассмотренном диапазоне размеров капель) сжигание мазута без значительного образования сажи может быть реализовано при $\alpha \geq 0,7$, в режиме предварительного перемешивания с нагретым воздухом и испарения — при $\alpha \geq 0,5$. *лимитной смеси*

Таким образом, условия сжигания мазута, обеспечивающие максимальное получение восстановительного газа с минимальным содержанием сажи, сводятся к следующему:

1) $\alpha \geq 0,5$;

2) мазут предварительно равномерно перемешивается с нагретым воздухом и испаряется.

Однако используемые математические модели содержат значительные допущения, поэтому необходима экспериментальная проверка сделанных выводов.

*древ можно установить
можно?*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

реакторный стенд

Испытания горелочных устройств на мазуте с воздухом проводили на стендовом комплексе РНЦ «Прикладная химия». Основные системы стенда позволяли подавать низконапорный воздух с расходом до 1500 нм³/ч при давлении 500 Па и высоконапорный ($p \leq 1,5$ МПа) с расходом до 500 нм³/ч. Термостатируемая система подачи мазута обеспечивала расход до 0,15 кг/с при давлении $0,4 \div 0,8$ МПа и температуре $398 \div 403$ К.

С помощью системы контрольно-измерительной аппаратуры измеряли расход, температуру и давление воздуха и мазута, а также параметры продуктов сгорания в различных сечениях топочной камеры, включая отбор газа и хроматографическое определение его состава (N_2 , CO_2 , CO , O_2 , CH_4 , H_2 , H_2O), определение концентрации твердой фазы и концентраций CO , CO_2 и H_2O оптическим методом при помощи спектрофотометра «Свирель МЗЛ», разработанного в Институте физики АН Белоруссии. Погрешность измерения давления не превышала 2 %, температуры — 5 %, концентрации газовых компонентов — 10 %, твердой фазы — 20 %.

Горелочные устройства устанавливали на топочной камере, имеющей ступенчатый профиль: камера подготовки топливной смеси диаметром 380 и длиной 700 мм, к которой пристыковывалось горелочное устройство, и камера сгорания диаметром 1070 и длиной 2600 мм. Внутренняя поверхность камеры была покрыта горелочным камнем. Для распыла мазута использовали штатные форсунки НАУСК (ввод горючего через струйные форсунки под углом к потоку воздуха, подача с закруткой низконапорного воздуха на распыл и сжигание), форсунки ТЕС-СНЕ-2 (центробежные, подача высоконапорного воздуха на распыл и низконапорного с закруткой на сжигание), а также различные пневматические форсунки как с использованием штатных авиационных воздушных завихрителей, так и оригинальной конструкции, разработанной авторами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение первых двух типов форсунок проводилось на основе анализа опытных данных, включающих поля концентраций основных компонентов продуктов сгорания и распределения температур в двух сечениях топочной камеры: по середине ($l_1 = 1300$ мм) и в выходном сечении ($l_2 = 2500$ мм). Местное значение коэффициента избытка определялось по опытному составу газа в данной точке:

$$\alpha_m = (2X_{CO_2} + X_{CO} + 2X_{O_2} + X_{H_2O}) / (2X_{CO_2} + X_{CO} + X_{H_2O} + 2X_C + 0,5X_{H_2}),$$

где X_i — мольная доля i -го компонента.

Эксперименты показали, что имеет место значительная неравномерность распределения продуктов сгорания по составу и температуре для обоих типов форсунок: для основной части сечения изменение α составляло ± 28 %, а в области оси и пристеночной части отклонение от среднего значения было еще больше. Топливная форсунка НАУСК создает в факеле распыла более крупные капли, но обеспечивает более равномерное распределение топливной смеси по сечению камеры. Температурные поля для обоих типов форсунок имеют более равномерный характер распределения по сравнению с концентрационным полем, что, по-видимому, является следствием выравнивающего действия лучистого теплообмена на частиц. На стационарный режим топочная камера выходит за $30 \div 40$ мин работы. Задымленность продуктов сгорания по мере прогрева стенки камеры и снижения влияния

тепловых потерь уменьшается, что согласуется с результатами расчетно-теоретического анализа. Проведены экспериментальные оценки содержания твердого углерода в продуктах сгорания исходя из известной величины α и опытных величин концентраций CO и CO₂. Результаты приведены на рис. 3.

Следует отметить, что вблизи устья форсунки НАУСК появляются значительные отложения кокса. После работы форсунки общей продолжительностью 10 ч заметно изменяются расходные характеристики форсунки и ухудшается полнота сгорания мазута. Разборка и чистка форсунки восстанавливают ее первоначальные характеристики.

В соответствии со сказанным выше для обеспечения безсажевого горения необходимо подготавливать гомогенную, однородную по пространству топливную смесь. Процесс подготовки топливной смеси разбивается на стадии. Сначала сжигается малая часть горючего при $\alpha > 1$, в полученный горячий газ добавляют оставшееся горючее и окислитель. Параметры в первой зоне подбираются таким образом, чтобы обеспечить прогрев оставшегося воздуха и мазута, его испарение.

Было разработано два варианта горелочных устройств, отвечающих этим требованиям и обеспечивающих горение предварительно испаренного мазута. В первом варианте использовали пневматические топливные форсунки с завихрителем воздуха улиточного типа. Горелочное устройство первой стадии работало при $\alpha = 1,3$. Подогретый воздух и мазут подавались во фронтное устройство основной камеры, включающее четыре воздушных завихрителя улиточного типа с углом закрутки $\varphi = 45^\circ$. Результаты испытаний показали лучшую однородность состава продуктов сгорания по сравнению с форсунками, рассмотренными выше; массовое содержание сажи уменьшилось до 0,3 %. Однако имеется один недостаток — значительный разогрев днища, на котором крепились завихрители.

Разработана конструкция пневматической сверхзвуковой форсунки для распыла мазута, в которой мазут вводится в сверхзвуковой поток воздуха вблизи критического сечения. Высокотонкий распыл мазута достигается за счет эффекта вторичного дробления. Неравномерность по α составила ± 11 %, за исключением пристеночного слоя, где α больше среднего значения на $15 \div 20$ %. Содержание углерода в продуктах сгорания упало приблизительно на порядок по сравнению со случаем использования форсунок НАУСК и ТЕС-СНЕ-2 (см. рис. 3).

Из сопоставления расчетных и экспериментальных данных следует, что используемая математическая модель для описания столь сложного процесса дает удовлетворительные результаты, несмотря на серьезные допущения. По-видимому, эти допущения в основном отражают существо происходящих процессов.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель процесса горения мазута при недостатке окислителя.

Основной причиной падения полноты сгорания мазута при $\alpha < 0,7$ является сажеобразование при пиролизе и замедление выгорания сажи и коксовых остатков вследствие теплотерь излучением частиц сажи, образующихся при пиролизе.

Для обеспечения максимальной полноты сгорания предложено предварительно испарять мазут и максимально равномерно перемешивать с воздухом.

Разработано горелочное устройство, обеспечивающее минимальное сажеобразование.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жарков Б. Л.** Результаты экспериментальных исследований процесса сгорания одиночных капель тяжелых жидких топлив // Тр. ВНИИЖТ. 1962. Т. 228, № 10. С. 5.
2. **Печковская К. А.** Сажа как усилитель каучука. М.: Химия, 1968.
3. **Клейтон, Бэк.** Физико-химические характеристики ценосфер, образующихся при сжигании мазута // Современное машиностроение. Сер. А. 1990. № 4. С. 80.
4. **Chiu H. H., Liu T. M.** Group combustion of liquid droplets // Combust. Sci. Technol. 1977. V. 17. P. 127.
5. **Ashgriz N., Chiang C. H., Arrarwal S. K.** Flame structure in fuel rich mono-dispersed sprays // Int. Comm. Heat Mass Transfer. 1988. V. 15, N 6. P. 765-772.
6. **Игнатьев В. Н., Мухаметов М. Х.** Модель диффузионного горения совокупности капель // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 67.
7. **Турбулентные течения газозвеси** / Л. А. Шрайбер, Л. Б. Гавин, В. А. Наумов и др. Киев: Наук. думка, 1987.
8. **Жоров Ю. М.** Термодинамика химических процессов. М.: Химия, 1985.
9. **Кузьмин А. И., Харченко С. С.** Математическое моделирование горения суспензионных горючих // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 6. С. 41-48.
10. **Сполдинг Д. Б.** Горение и массообмен. М.: Машиностроение, 1985.
11. **Шекли Г. А., Фит Г. М.** Характеристики горения капель углеродного пастообразного топлива // Ракетная техника и космонавтика. 1982. Т. 20, № 4. С. 118.
12. **Теория топочных процессов** / Г. Ф. Кнорре и др. М.; Л.: Энергия, 1966.

*Поступила в редакцию 10/І 1996 г.,
в окончательном варианте — 11/ІХ 1996 г.*
