

УДК 532.621.78

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ВОДО-МАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ****Черниченко В.Е.****Кременчугский государственный политехнический университет****Сергеева Ю. Н.****Днепродзержинский государственный технический университет**

**Введение.** Наличие влаги затрудняет сжигание мазута вследствие образования пробок воды, прерывающих равномерную подачу топлива к форсункам и осложняющих эксплуатацию котлов.

При отстаивании мазута происходит отделение влаги. Однако в тяжелых и вязких мазутах это отделение осуществляется с большими трудностями. Поэтому было предложено мазут с высоким содержанием влаги сжигать в виде водо-мазутной эмульсии, создаваемой путем перемешивания мазута с водой острым паром или пропускания обводненного мазута через эмульгаторы. Содержание воды в мазуте заметно сказывается на его теплоте сгорания. Каждый процент влаги снижает теплоту сгорания мазута на 418,68 кДж, из которых около 393,56 кДж обусловлено уменьшением содержания горючей массы топлива и 25,12 кДж – расходом тепла на испарение 1 % воды [1].

В натуральных жидких топливах горючие элементы находятся в различных химических соединениях, по теплоте образования которых нет данных. Так как теплоту сгорания жидких топлив невозможно аналитически определить по их элементарному химическому составу, то ее определяют экспериментально с помощью калориметра.

Сущность этого метода заключается в том, что в герметически закрываемом стальном цилиндрическом сосуде, который называется калориметрической бомбой, помещают в среде кислорода под давлением 2, 5 – 3 МПа навеску испытуемого топлива в 1 г. Бомбу погружают в водяной калориметр. В калориметрической бомбе водяные пары, выделяющиеся при сгорании водорода и испарении влаги пробы топлива, конденсируются, выделяя теплоту парообразования. Но вместе с тем в бомбе теплота сгорания получается больше, чем  $Q_b^p$ , так как при сгорании пробы топлива в бомбе в среде кислорода протекают экзотермические реакции образования серной и азотной кислоты, которые в топочных условиях не имеют места [2].

Введя поправку к величине  $Q_b$  на теплоту образования в бомбе азотной кислоты и окисление сернистого газа в  $SO_3$  и растворение последнего в воде, получают высшую теплоту сгорания, МДж/к

$$Q_b^p = Q_b - 94,3 \cdot 10^{-2} S_{op+k} - 4,19 \cdot 10^{-6} Q_b,$$

где  $Q_b$  – теплота сгорания по бомбе;  $94,3 \cdot 10^{-2} S_{op+k}$  – теплота, выделяющаяся при окислении в бомбе  $SO_2$  и  $SO_3$  и растворения последней в воде;

$4,19 \cdot 10^{-6} Q_b$  – теплота образования азотной кислоты в бомбе для жидких топлив.

Водо-топливная эмульсия является особым видом топлива, качественно и количественно изменяющим процесс горения. Содержащиеся в топливе высокодисперсные частицы водной фазы при нагреве превращаются в паровые пузырьки, мгновенно дробящие топливные капли на мельчайшие частицы. Они быстрее прогреваются и интенсивнее взаимодействуют вначале с кислородом, образующимся в результате диссоциации воды, воспламеняются и, перемешиваясь с кислородом воздушного заряда, ускоренно сгорают. Находящаяся в составе эмульгированного топлива, водная фаза может быть диссоциирована частично в ходе окисления топлива в предпламенных процессах. Затем по мере повышения температуры в фазе активного сгорания реакция диссоциации воды ускоряется. Образующийся при диссоциации избыток атомов водорода быстро диффундирует в область с избытком кислорода, где их реакция компенсирует затраты энергии на диссоциацию воды. Участие в реакции горения дополнительного количества водорода приводит к увеличению количества продуктов сгорания. Молекулы воды ускоряют ход реакции в окислительных процессах и вследствие возникновения полярного эффекта существенно улучшая ориентацию частиц радикалов топлива.

**Цель работы.** Исследование комплексного влияния на теплоту сгорания водо-мазутных эмульсий (“у”):

- температура эмульсии ( $x_1$ );
- содержание воды ( $x_2$ );
- содержание эмульгатора ( $x_3$ );
- количество капель воды в единице объема эмульсии ( $x_4$ ).

**Материалы и результаты исследований.** Для построения квадратичной модели зависимости “у” от факторов  $x_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ) методами планирования эксперимента выбран ортогональный центральный композиционный план  $2^4$  [3]. Условия экспериментов представлены в таблице 1. Матрица планирования экспериментов и результаты опытов по определению теплоты сгорания водо-мазутной эмульсии приведены в таблице 2.

После обработки результатов эксперимента получена квадратичная модель зависимости в виде  $y = 6979,6 + 201,08X_1 - 181,73X_2 + 189,22X_3 + 205,43X_4 -$

$$-249,75(X_1^2-0,8)-224,75(X_2^2-0,8)+550,25(X_3^2-0,8)-$$

$$-424,75(X_4^2-0,8)-185,62X_1 \cdot X_2-116,88X_1 \cdot X_3-$$

$$-113,12X_1 \cdot X_4-653,13X_2 \cdot X_3-134,38X_2 \cdot X_4-$$

$$-178,12X_3 \cdot X_4,$$

где  $x_k$  ( $k=1, \dots, 4$ ) – кодированные значения факторов.

Для проверки значимости отличия от нуля полученных коэффициентов в модели по результатам четырех повторных опытов в нулевой точке ( $X_1=X_2=X_3=X_4=0$ ), результаты  $\bar{y}$ : 6887; 6101; 6303; 6709, была найдена дисперсия ошибок опытов  $S^2$  [4, 5]. После вычислений по формуле

$$S^2 = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (y_i - \bar{y})^2$$

получено  $S^2=130487$ .

Проверка значимости коэффициентов модели определена по “порогам” значимости различных эффектов факторов  $h_k \cdot S$ , где  $h_k=t_{\text{табл}} \cdot \sqrt{C_k}$  ( $k=1; 2; 3$ ),  $t_{\text{табл}}$  – это табличное значение статистики Стьюдента, найденное для уровня значимости  $\alpha=0,05$  и числа степеней свободы  $\varphi=3$ ,  $t_{\text{табл}}(0,05; 3)=3,18$  [1]. В результате получили для линейных эффектов факторов  $h_1=3,18 \cdot \sqrt{0,05}=0,712$ , для квадратичных эффектов  $h_2=3,18 \cdot \sqrt{0,125}=1,125$ , для эффектов взаимодействия факторов  $h_3=3,18 \cdot \sqrt{0,0625}=0,796$ .

После проверки коэффициентов модели на значимость отличия от нуля для кодированных значений факторов получена следующая модель для значимо влияющих эффектов факторов

$$\bar{y}=6600+201,08X_1+205,43X_4+550,25X_3^2-424,75X_4^2-$$

$$-653,13X_2 \cdot X_3$$

В этой модели эффекты влияния фактора  $X_4$  можно свернуть и представить

$$205,43X_4-424,75X_4^2=-424,75(X_4-0,242)^2+24,84.$$

Тогда

$$\bar{y}=6624,84+201,08X_1+550,25X_3^2-424,75(X_4-$$

$$0,242)^2-653,13X_2 \cdot X_3.$$

Для проверки адекватности этой модели по формуле

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

была найдена остаточная дисперсия, где  $y_i$  – это фактические, а  $\bar{y}_i$  – расчетные значения показателя  $y$ , полученные по модели  $i=1, \dots, n$ ,  $n=25$ ;  $k$  – число коэффициентов в модели,  $k=6$ . В результате  $S_{\text{ост}}^2=728518,2$ .

Проверка адекватности проводилась по критерию Фишера. Расчетное значение статистики Фишера

$$F_p = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S^2} = \frac{728518,2}{130487} = 5,583,$$

что меньше табличного значения  $F_{\text{табл}}(0,05; 19; 3)=8,667$ . Поэтому полученная модель адекватна истинной зависимости и с достоверностью 0,95 может использоваться для анализа и прогноза.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшее влияние на теплоту сгорания

оказывает фактор  $X_2$  – содержание воды в эмульсии. Очевидно, что с увеличением объема дискретной фазы воды теплота сгорания водомазутной эмульсии снижается, что и отражено качественно и количественно в результатах экспериментов. Следует отметить, что при сжигании топлива эта зависимость проявляется иначе. В процессе диспергирования ВТЭ капли воды при вскипании, разрываясь, оказывают дополнительное воздействие на процесс дробления. В результате этого образуется поток с большой дисперсностью. В свою очередь, капли меньших размеров быстрее испаряются и факел становится более коротким. Таким образом, сжигание происходит эффективнее с меньшими химическим и механическим недожогами. Поэтому, несмотря на заметное снижение теплоты сгорания ВТЭ при увеличении содержания в ней воды, вода, безусловно, оказывает положительный эффект.

Следующий по степени влияния на теплоту сгорания фактор –  $X_1$  – температура эмульсии. С повышением температуры эмульсии увеличивается теплота сгорания, поскольку меньше энергии затрачивается на нагрев топлива.

В наших экспериментах в качестве эмульгатора использовано дизельное топливо (фактор  $X_3$ ), которое выполняло еще и функцию пластификатора. При предварительном грубодисперсном эмульгировании с последующим охлаждением эмульсии наблюдалась следующая закономерность. При снижении температуры до  $\approx 60^\circ\text{C}$  изменялась структура мазута и вода “выжималась” в крупные капли, которые затем сливались в промежуточные слои. При добавлении дизельного топлива до 10% это явление не наблюдалось. Таким образом, наличие дизельного топлива в ВТЭ повышало устойчивость эмульсии, что в свою очередь сказывалось и на теплоте сгорания. Кроме того, дизельное топливо само по себе является в данном случае высококалорийной добавкой к топливу.

Фактор  $X_4$  – количество капель воды в единице объема – определяет дисперсность эмульсии. Очевидно из вышесказанного, что повышение степени дисперсности способствует увеличению теплоты сгорания, но, скорее всего, косвенно.

Влияние коэффициентов при квадратичных факторах отражает скорее всего особенности выбора диапазона изменения варьируемых величин факторов. Таким образом при смещении коэффициентов при факторах были бы иными. Поэтому закономерности  $y=f(X_1^2, X_2^2, X_3^2, X_4^2, X_1X_2, X_1X_3, X_1X_4, X_2X_3, X_2X_4, X_3X_4)$  опускаем.

**Выводы.** Из полученной модели следует, что с увеличением температуры эмульсии на  $40^\circ$  теплота сгорания увеличивается на 201,08 ккал/кг.

С увеличением содержания эмульгатора на 4% теплота сгорания увеличивается на 550,25 ккал/кг.

С увеличением количества капель воды в

единице объема эмульсии теплота сгорания уменьшается на 321, 96 ккал/кг.

Увеличение содержания воды на 12% при одновременном увеличении содержания эмульгатора на 4% приводит к уменьшению теплоты сгорания на 653 ккал/кг. И наоборот, при

тех же условиях уменьшения воды на 12% приводит к увеличению теплоты сгорания на 653 кал/кг.

Все эти выводы верны в условиях проведения эксперимента.

**Таблица 1 –  
Условия экспериментов**

Фактор	Код	Уровни варьирования					Интервал варьирования, Δ
		-1,414	-1	0	1	+1,414	
Температура эмульсии, °С	X <sub>1</sub>	4	20	60	100	116	40
Содержание воды, %	X <sub>2</sub>	0	6	18	30	36	12
Содержание эмульгатора, %	X <sub>3</sub>	0	2	6	10	12	4
Количество капель воды в единице объема эмульсии, 1/0.5см <sup>3</sup>	X <sub>4</sub>	10	20	40	60	70	20

**Таблица 2 –  
Матрица планирования экспериментов**

№	Фактор				Y
	X1	X2	X3	X4	
1	+	+	+	+	6030
2	-	+	+	+	5920
3	+	-	+	+	8290
4	-	-	+	+	7600
5	+	+	-	+	5930
6	-	+	-	+	7750
7	+	-	-	+	7980
8	-	-	-	+	5430
9	+	+	+	-	5920
10	-	+	+	-	5710
11	+	-	+	-	8000
12	-	-	+	-	7510
13	+	+	-	-	7700
14	-	+	-	-	5250
15	+	-	-	-	5390
16	-	-	-	-	5200
17	-1.414	0	0	0	6900
18	+1.414	0	0	0	6300
19	0	-1.414	0	0	6100
20	0	+1.414	0	0	7200
21	0	0	-1.414	0	8400
22	0	0	+1.414	0	8000
23	0	0	0	-1.414	6300
24	0	0	0	+1.414	6200
25	0	0	0	0	6500

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Равич М. Б. Топливо и эффективность его использования. М., изд-во «Наука», 1971.
2. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб. Пособие для студентов высш. учеб. заведений. М., «Энергия», 1976 – 488 с., ил.
3. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. и др. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов. –М: Мир, 1977
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске

оптимальных условий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279с., ил.

5. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. – Киев: Вища школа, головное изд-во, 1976. – 184 с., ил.

Статья поступила 10.03.06.

Рекомендовано к печати д.т.н. проф. Яловой Н.И.,