

УДК 66.096.5: 62-971.2; 66.094.3.097

DOI: 10.15372/KhUR20170313

## Сжигание сланцевого фуса в кипящем слое катализатора

Н. А. ЯЗЫКОВ<sup>1</sup>, А. Д. СИМОНОВ<sup>1</sup>, А. С. АФЛЯТУНОВ<sup>1</sup>, Ю. В. ДУБИНИН<sup>1</sup>, С. А. СЕЛИЩЕВА<sup>1</sup>, В. А. ЯКОВЛЕВ<sup>1</sup>, А. И. СТЕПАНЕНКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск, Россия

E-mail: yazykov@catalysis.ru

<sup>2</sup>ЗАО “Гормашэкспорт”,  
Новосибирск, Россия

(Поступила 31.03.16)

### Аннотация

Исследовано каталитическое сжигание фуса, образующегося при переработке прибалтийских сланцев, с целью оценки эффективности сжигания в присутствии промышленного алюмомеднохромового катализатора полного окисления органических веществ с содержанием активного компонента 10 %. Определены оптимальные температурные режимы каталитического сжигания. Изучена возможность проведения процесса сжигания фуса в кипящем слое катализатора без использования дополнительного топлива.

Показано, что максимальная степень выгорания 97.7–97.8 % достигается при 700–750 °С. При этом концентрация вредных веществ в отходящих газах составляла, м. д.: CO 244–269, NO<sub>x</sub> – 179–229, SO<sub>2</sub> – отсутствует. На основе литературных данных по каталитическому сжиганию серосодержащей нефти показано, что при длительной работе установки по каталитическому сжиганию фуса в автотермическом режиме, с учетом содержания оксида кальция в минеральной составляющей фуса, концентрация SO<sub>2</sub> на выходе из реактора может достигать 60 м. д. Содержание углерода в зольном остатке составило 2.3–2.4 %. По содержанию CaO зола относится к основной золе уноса и может быть использована как добавка к цементам.

На основе результатов каталитического сжигания фуса в автотермическом режиме в лабораторной установке определены выбросы вредных веществ в отходящих газах при использовании фуса в качестве топлива для каталитической котельной при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.2$ . Показано, что выбросы вредных веществ при сжигании фуса не превышают значения предельно допустимых выбросов для каждого компонента, вплоть до фоновой величины (0.9ПДК).

**Ключевые слова:** сланцевый фус, катализатор, кипящий слой, сжигание

### ВВЕДЕНИЕ

Одно из направлений использования горючих сланцев в энергетике – получение смолы, основного продукта их переработки [1]. В процессе газогенераторной переработки горючего сланца в результате обволакивания летучей твердой фазы смолой, содержащейся в парогазовой смеси, образуется побочный продукт – фус [2].

Для утилизации фусов в настоящее время используются такие методы, как сжигание вместе с твердым топливом, возврат в газогенераторы

для дополнительной переработки, извлечение из фусов смолы [2, 3], а также совместная переработка с другими твердыми отходами путем термолиза [4]. Тем не менее отходы переработки сланцев зачастую складываются, нанося ущерб окружающей среде [5]. Образующиеся в процессе переработки сланцев фусы могут быть утилизированы с использованием технологии каталитического сжигания.

В Институте катализа СО РАН (Новосибирск) разработана технология сжигания топлива в кипящем слое катализатора, основанная на четырех принципах: 1) применение

катализатора глубокого окисления органических веществ; 2) использование кипящего слоя частиц катализатора; 3) сжигание смесей топлива и воздуха, близких к стехиометрии; 4) совмещение тепловыделения и теплоотвода в едином слое катализатора [6]. В работах [7–10] показано, что применение такой технологии позволяет эффективно сжигать различные топлива, в том числе низкокалорийные (торф, древесные опилки, горючие сланцы, осадки сточных вод), при этом степень выгорания топлива превышает 97 %.

В данной работе исследовано каталитическое сжигание фуса, образующегося при переработке прибалтийских сланцев, с целью оценки эффективности сжигания в присутствии промышленного катализатора полного окисления органических веществ ШКЗ-1, определения оптимальных температурных режимов каталитического сжигания и оценки возможности проведения процесса сжигания в кипящем слое катализатора без использования дополнительного топлива при реализации процесса в промышленных масштабах.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования процесса каталитического сжигания фуса в кипящем слое использовали оксидный алюмомеднохромовый катализатор (ШКЗ-1) производства ООО «Щелковский катализаторный завод» (г. Щелково) со средним размером частиц 1.75 мм, содержанием активного компонента 10 мас. % (ТУ 2171-005-51444844-01). Характеристики этого катализатора детально исследованы в работе [11].

Состав газов на выходе из реактора определяли с помощью газоанализатора «ПОЛАР» производства ООО «Промэкоприбор» (Россия).

Влажность фуса определяли по потере массы в процессе сушки при 105–110 °С до постоянной массы [12]. Учитывая, что в фусе могут содержаться органические вещества, которые при этой температуре испаряются, влажность дополнительно определяли по потере массы при выдержке фуса в эксикаторе с КОН (квалификация «х. ч.», ГОСТ 24363–80) в течение 100 ч при комнатной температуре.

Количество летучих веществ в фусе определяли по потере массы при 900 °С в течение 7 мин [13].

Зольность фуса до сжигания и остатка после сжигания в кипящем слое катализатора определяли по потере массы при прокаливании при 815 °С в токе воздуха в течение 2 ч [14].

Элементный анализ органической составляющей фуса и содержание углерода в зольном остатке после сжигания фуса в кипящем слое катализатора проводили с использованием прибора HCNS-анализатора Vario EL cube Elementar (Германия).

Содержание элементов, входящих в состав золы фуса, определяли рентгеноспектральным флуоресцентным методом на анализаторе ARL-Advant'x (Швейцария) с Rh-анодом рентгеновской трубки.

Степень выгорания фуса  $\beta$  рассчитывали по формуле

$$\beta = 10^4(A_T - A_0) / A_T(1 - A_0)$$

где  $A_0$  – доля золы в исходном сухом образце, %;  $A_T$  – доля золы в твердых продуктах после сжигания фуса, %.

Теплоту сгорания фуса в бомбе определяли с использованием калориметра ИКА С200 (Германия).

Выброс газообразных вредных веществ при сжигании фуса  $\Phi 1$  ( $B_j$ ) для каталитической котельной мощностью 1 МВт при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.2$  определяли по формуле

$$B_j = B_{j/уд} G_{фус}$$

где  $B_{j/уд}$  – количество газообразного вредного вещества, образующегося при сжигании 1 кг фуса  $\Phi 1$ , г/кг;  $G_{фус}$  – расход топлива для котельной 1 МВт, равный 0.060 кг/с.

Величину  $B_{j/уд}$  определяли из экспериментальных данных, полученных при сжигании фуса  $\Phi 1$  в автотермическом режиме в лабораторной установке при 700 °С:

$$B_{j/уд} = 10^{-3} C_j k_j V / g_{фус}$$

где  $C_j$  – концентрация  $j$ -го газообразного вредного вещества в отходящих газах, м. д.;  $k_j$  – коэффициенты перевода м. д. в мг/м<sup>3</sup>, приведенные в [15];  $V$  – объем отходящих газов при автотермическом сжигании фуса  $\Phi 1$  в лабораторной установке при 700 °С, равный 0.0028 м<sup>3</sup>/с;  $g_{фус}$  – расход фуса  $\Phi 1$  при автотермическом сжигании в лабораторной установке при 700 °С, равный  $0.183 \cdot 10^{-3}$  кг/с. В случае SO<sub>2</sub> концентрацию в отходящих газах при сжигании фуса  $\Phi 1$  в автотермическом режиме принимали равной 60 м. д.

Выброс пыли  $B_{\text{п}}$  рассчитан для случая использования при очистке газов последовательно циклона типа СКЦН-34 со степенью очистки 89 % [16] и установки рукавных фильтров типа РФУ3.5 со степенью очистки не ниже 99.9 % [17], с учетом содержания золы в фусе и степени выгорания фуса при 700 °С по формуле

$$B_{\text{п}} = 1000G_{\text{фус}}[A^r + (1 - A^r - W_t^r)(1 - \beta)](1 - \eta_{\text{ц}}) \times (1 - \eta_{\text{ф}})$$

где  $G_{\text{фус}}$  – расход топлива для котельной 1 МВт, равный 0.060 кг/с;  $A^r$  – зольность рабочей массы фуса в долях, равная 0.398;

$W_t^r$  – общая влага в фусе, в долях, равная 0.077;  $\beta$  – степень выгорания фуса в долях, равная 0.977;  $\eta_{\text{ц}}$  – степень очистки газа в циклоне в долях, равная 0.89;  $\eta_{\text{ф}}$  – степень очистки газа фильтром в долях, равная 0.999.

Предельно допустимый выброс  $j$ -го газообразного вещества (ПДВ $_j$ ) определяли в соответствии с нормативным документом [18]. Значение ПДВ для одиночного источника с круглым устьем в случае  $c_{\text{ф}} < \text{ПДК}$  для каждого компонента определяли по формуле

$$\text{ПДВ}_j = (\text{ПДК}_j - c_{\text{ф}/j})H^2(V_1\Delta T)^{1/3}/AFm\eta$$

где ПДВ – предельно допустимый выброс вредного вещества, г/с; ПДК – предельно

допустимая концентрация вредного вещества, мг/м<sup>3</sup> (в расчетах используются значения максимальных разовых предельно допустимых концентраций);  $H$  – высота источника выброса над уровнем земли, равная 20 м;  $V_1$  – объем дымовых газов, равный 0.353 м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T_r$  (120 °С) и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_b$  (26 °С), равная 94 °С (при определении значения  $\Delta T$  следует принимать температуру окружающего атмосферного воздуха  $T_b$  равной средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года);  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы (для различных районов значения приведены в [18], для Европейской территории России севернее 52° с. ш.  $A = 160$ );  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе (для газообразных вредных веществ и мелкодисперсных аэрозолей, таких как пыли и золы, скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю,  $F = 1$ );  $n$  и  $m$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выб-

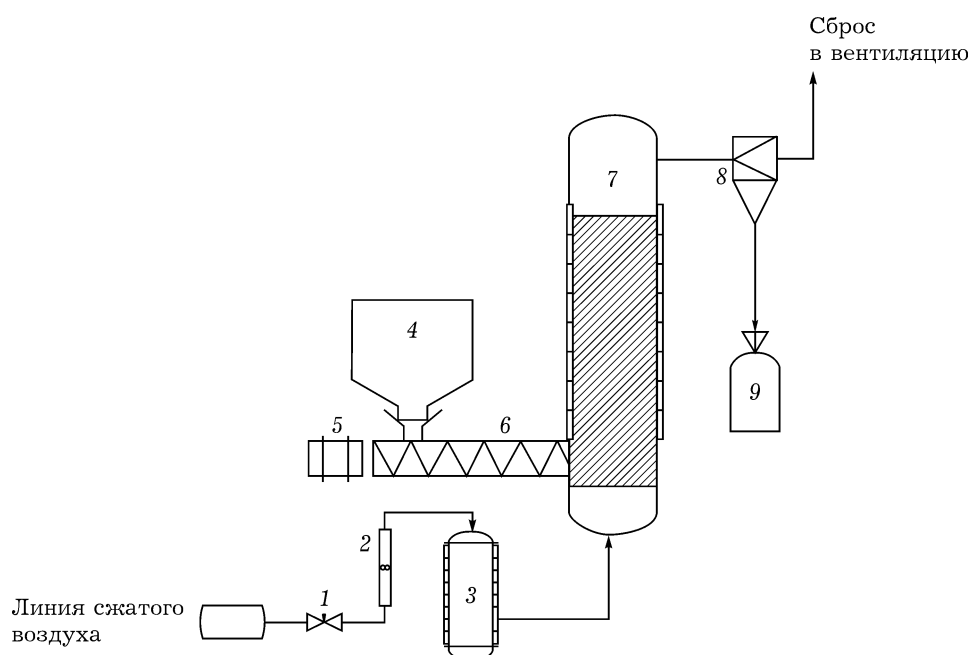


Рис. 1. Принципиальная схема установки для исследования процесса каталитического сжигания фуса: 1 – регулировочный вентиль, 2 – ротаметр, 3 – электронагреватель воздуха, 4 – бункер для твердого топлива (фуса), 5 – электродвигатель, 6 – шнековый дозатор, 7 – реактор кипящего слоя с электроподогревом, 8 – циклон, 9 – емкость для золы.

роса,  $n = 1.82$ ,  $m = 0.43$  (рассчитаны по формулам, приведенным в [18];  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ ; значения ПДК вредных веществ в расчетах приняты в соответствии с гигиеническими нормативами [19] и составляют, мг/м<sup>3</sup>: SO<sub>2</sub> 0.5, NO<sub>2</sub> 0.085, NO 0.4, CO 5, пыль 0.3 мг/м<sup>3</sup> (для пыли с содержанием SiO<sub>2</sub> 20–70 %).

Схема установки для исследования каталитического сжигания фуса приведена на рис. 1.

В реактор 7 с внутренним диаметром 75 мм и высотой 1500 мм из нержавеющей стали загружали 3.5 л катализатора полного окисления органических веществ ШКЗ-1. В бункер 4 загружали фус Ф1, предварительно измельченный до размеров частиц менее 5 мм. Для вывода реактора на рабочий температурный режим слой катализатора в режиме кипения нагревался с помощью внешнего электронагревателя реактора и с помощью электронагревателя воздуха 3 при расходе воздуха 10 м<sup>3</sup>/ч. Расход воздуха устанавливали с помощью вентиля 1 и ротаметра 2. Образующийся остаток от сжигания фуса в режиме пневмотранспорта поступал в циклон 8 и после отделения от газа направлялся в емкость для золы 9.

Процесс сжигания проводили при температурах 650, 700 и 750 °С. Расход фуса Ф1 составлял 610–710 г/ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используемые в работе образцы прибалтийских фусов Ф1 и Ф2 имели различную консистенцию: фус Ф1 – в виде комков, которые при механическом воздействии рассыпались на более мелкие частицы. Плотность его в таком виде составляла 1050 кг/м<sup>3</sup>. Фус Ф2 представлял собой единый кусок с плотностью 1250 кг/м<sup>3</sup>, который при механическом воздействии трескался, но не разделялся на отдельные частицы и проявлял пластичность. Такое различие в свойствах, по-видимому, связано с различным содержанием твердой фазы и воды. Определены элементный состав, зольность и влажность образцов Ф1 и Ф2. В условиях сушки при 105–110 °С потеря массы для Ф1 составила 14.5 %, для Ф2 – 17.8 %. Высокое значение влажности, по-видимому, обусловлено выделением летучих органических веществ при этой температуре. Определение влажности с использованием сушки в эксикаторе при комнатной температуре для исключения выделения летучих органических

ТАБЛИЦА 1

Состав рабочей массы образцов фуса Ф1 и Ф2

Образцы	Состав рабочей массы, %					A <sup>r</sup>	W <sub>t</sub> <sup>r</sup> , %***
	C <sup>r</sup>	H <sup>r*</sup>	O <sup>r**</sup>	S <sup>r</sup>	N <sup>r</sup>		
Ф1	40.0	4.1	7.0	1.3	0.1	39.8	7.7
Ф2	40.5	3.9	8.3	1.2	0.1	34.8	11.2

\* Определено по формуле:  $H^r = H^a - 0.112W_t^r$ , где  $H^a$  – содержание водорода в аналитической пробе, %;  $W_t^r$  – общая влага в фусе, %; 0.112 – коэффициент, учитывающий содержание водорода в воде; индекс <sup>r</sup> обозначает рабочее состояние топлива.

\*\* Определено из баланса.

\*\*\* Принято по потерям массы при сушке в эксикаторе над КОН.

ТАБЛИЦА 2

Состав сухой беззольной массы образцов фуса Ф1 и Ф2

Образцы	V <sup>daf</sup> , %	Состав сухой беззольной массы, %				
		C <sup>daf</sup>	H <sup>daf</sup>	O <sup>daf</sup>	S <sup>daf</sup>	N <sup>daf</sup>
Ф1	84.2	76.2	7.8	13.3	2.5	0.2
Ф2	86.5	75.0	7.2	15.4	2.2	0.2

ТАБЛИЦА 3

Теплота сгорания фусов

Параметры	Значение,	
	кДж/кг	ккал/кг
Теплота сгорания фуса Ф1 в бомбе ( $Q_b^a$ )	18 243	4357
Высшая теплота сгорания фуса Ф1 ( $Q_s^a$ )	18 093	4321
Низшая теплота сгорания фуса Ф1 ( $Q_i^a$ )	17 010	4063
Низшая теплота сгорания фуса Ф1 ( $Q_i^r$ ) по формуле Менделеева [23]	16 974	4054
Низшая теплота сгорания фуса Ф2 ( $Q_i^r$ ) по формуле Менделеева [23]	16 677	3988

веществ показало, что потеря массы для Ф1 составила 7.7 %, для Ф2 – 11.2 %. Таким образом, в состав фусов входят летучие при 110 °С вещества в количестве 6.8 % для Ф1 и 6.6 % для Ф2.

Состав рабочей массы Ф1 и Ф2 приведен в табл. 1, горючей массы – в табл. 2. Состав сухой беззольной массы фусов рассчитывали по формулам, приведенным в [20]. Теплота сгорания фусов приведена в табл. 3.

Высшую теплоту сгорания  $Q_s^a$  определяли в соответствии с [21, 22] по формуле

$$Q_s^a = Q_b^a - (94 S_t^a + \alpha Q_b^a)$$

где 94 – коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты из диоксида серы и растворения серной кислоты в воде на 1 % серы, перешедшей при сжигании топлива в серную кислоту, кДж/кг;  $S_t^a$  – массовая доля серы в топливе;  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде азотной кислоты, равный для сланцев 0.0015.

Низшую теплоту сгорания  $Q_i^a$  вычисляли по формуле

$$Q_i^a = Q_s^a - 24.42(8.94H^a + W^a)$$

где 24.42 – теплота парообразования при температуре измерения 25 °С из расчета на 1 % выделившейся воды, кДж/кг; 8.94 – коэффициент пересчета массовой доли водорода на воду;  $H^a$  – массовая доля водорода в аналитической пробе топлива;  $W^a$  – массовая доля воды в аналитической пробе топлива.

Низшую теплоту сгорания  $Q_i^r$  также вычисляли по формуле Менделеева [23]:

$$Q_i^r = 81C^r + 246H^r - 26(O^r - S^r) - 6W_t^r$$

Из полученных результатов следует, что низшая теплота сгорания аналитической про-

бы фуса Ф1  $Q_i^a$  хорошо совпадает с низшей теплотой сгорания фуса Ф1  $Q_i^r$ , рассчитанной по формуле Менделеева.

Состав золы (негорючего остатка), полученного при 815 °С и продувке муфельной печи воздухом, приведен в табл. 4.

В промышленном масштабе при сжигании топлив, содержащих серу, в кипящем слое используют добавки поглотителя, например кальцита. Для эффективного улавливания  $SO_2$  молярное соотношение Ca/S должно быть не менее 2 [24]. Оценка этого соотношения показывает, что для Ф1 Ca/S = 2.6, для Ф2 – 2.9. Следовательно, можно предположить, что при

ТАБЛИЦА 4

Состав золы фусов Ф1 и Ф2, %

Компоненты	Ф1	Ф2
Na <sub>2</sub> O	0.91	0.53
MgO	5.31	5.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.44	16.89
SiO <sub>2</sub>	45.72	45.86
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.31
SO <sub>3</sub>	4.17	3.41
Cl	0.07	0.18
K <sub>2</sub> O	4.71	3.41
CaO	14.78	17.51
TiO <sub>2</sub>	0.56	0.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.49	4.27
ZnO	0.16	0.05
SrO	0.07	–
BaO	0.06	–
Другие соединения	0.18	1.56
Общий баланс	100	100

Примечание. Прочерк – отсутствует.

ТАБЛИЦА 5

Результаты сжигания фуса Ф1 в кипящем слое катализатора ШКЗ-1 в автотермическом режиме при различных температурах

T, °C	Расход Ф1, кг/ч	Расход воздуха, нм <sup>3</sup> /ч	Зольность остатка, %	Содержание углерода в золе, %	Степень выгорания Ф1, %
650	0.61	10.0	95.80	3.00	96.7
700	0.66	10.0	97.09	2.30	97.7
750	0.71	10.0	97.16	2.40	97.8

ТАБЛИЦА 6

Содержание вредных веществ на выходе из реактора (расход воздуха 10.0 нм<sup>3</sup>/ч)

T, °C	Расход Ф1, кг/ч	Содержание, м. д.				
		NO	NO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> *
650	0.61	153	0	230	0	0
700	0.66	178	1	244	0	0
750	0.71	225	4	269	0	0

\* В об. %.

сжигании таких фусов не нужно вводить дополнительный поглотитель серы. По содержанию СаО зола относится к основной золе уноса и может быть использована как добавка к цементам [25], как и золы уноса, образующиеся при сжигании различных углей [26].

Установка для проведения экспериментов по сжиганию фуса снабжена шнековым питателем, который предназначен дозировать сыпучие топлива. В связи с этим для работы выбран фус Ф1. После измельчения кусков до размеров менее 5 мм получилась сыпучая смесь частиц. Насыпная плотность измельченного фуса Ф1 составила 788 кг/м<sup>3</sup>.

В табл. 5 приведены результаты сжигания фуса Ф1 в кипящем слое алюмомеднохромового катализатора в автотермическом режиме при различных температурах. Данные по содержанию вредных веществ на выходе из реактора приведены в табл. 6. Видно, что максимальная степень выгорания (97.7–97.8 %) достигается при температуре проведения процесса 700–750 °C, при этом концентрация вредных веществ в отходящих газах следующая, м. д.: CO 244–269, NO<sub>x</sub> 179–229, SO<sub>2</sub> – отсутствует. Содержание углерода в зольном остатке составило 2.3–2.4 %.

В работе [27] на примере каталитического сжигания сернистой и высокосернистой нефти в кипящем слое такого же оксидного

алюмомеднохромового катализатора показано, что в начальный момент времени сера накапливается в катализаторе до определенного количества, а концентрация SO<sub>2</sub> в отходящих газах равна нулю. На постоянное значение концентрация SO<sub>2</sub> выходила после 3 ч работы. При добавлении кальцита или оксида кальция (молярное соотношение Ca/S = 2.0) концентрация SO<sub>2</sub> в отходящих газах составляла 10 % от максимально возможного значения, которое соответствует переходу в SO<sub>2</sub> всей серы, содержащейся в горючей массе. В связи с этим следует ожидать, что при длительной работе катализатора при сжигании фуса после насыщения катализатора серой концентрация SO<sub>2</sub> в отходящих газах будет расти. Учитывая, что степень поглощения SO<sub>2</sub> СаО, содержащимся в неорганической составляющей фуса, равна 90 % при 700 °C в зоне сжигания, концентрация SO<sub>2</sub> в отходящих газах при сжигании фуса Ф1 в автотермическом режиме может достигать 60 м. д. Образующийся в конечном итоге при взаимодействии оксида кальция с SO<sub>2</sub> в присутствии кислорода сульфат кальция в этих условиях практически не разлагается, так как разложение начинается при температурах выше 1000 °C [28].

Из полученных результатов следует, что технология каталитического сжигания топлив в кипящем слое может быть использована для

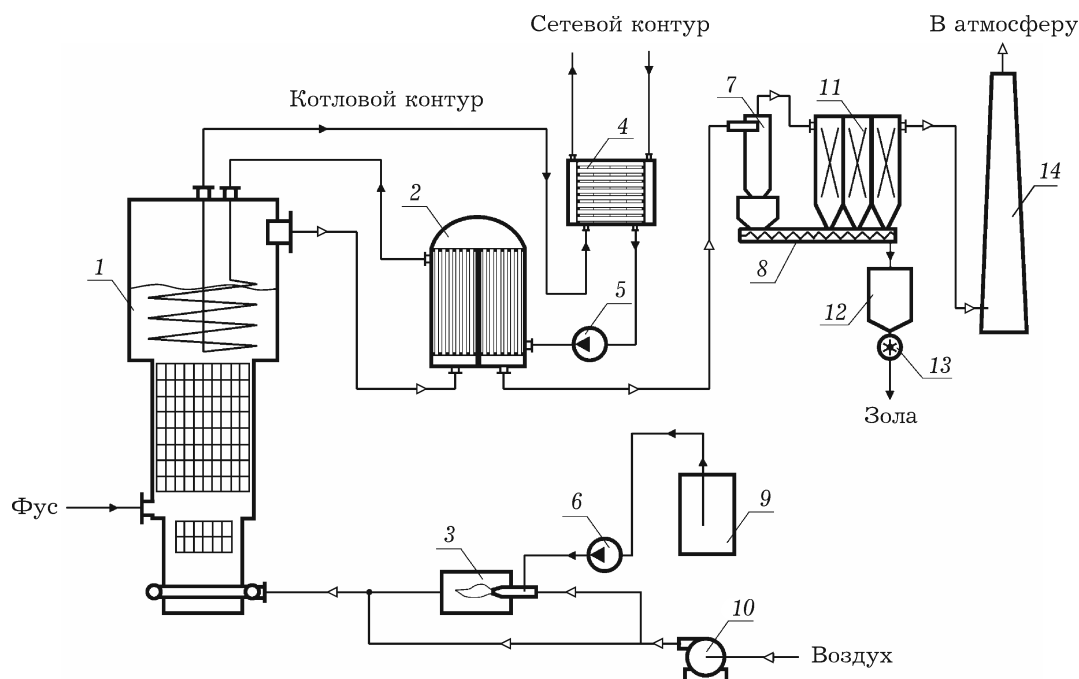


Рис. 2. Принципиальная схема каталитического сжигания фуса: 1 – реактор с кипящим слоем катализатора, 2 – экономайзер, 3 – теплогенератор жидкотопливный для предварительного нагрева слоя катализатора в период запуска, 4 – теплообменник, 5 – циркуляционный насос котлового контура, 6 – насос для подачи жидкого топлива, 7 – циклон, 8 – транспортер золы, 9 – бак для жидкого топлива, 10 – воздуходувка, 11 – фильтр рукавный, 12 – бункер для золы, 13 – питатель шлюзовой, 14 – дымовая труба.

утилизации фуса в автотермическом режиме с достижением высокой степени выгорания. Теплота, выделяющаяся при сжигании фуса, может быть использована для обеспечения автономного теплоснабжения жилых и производственных зданий тепловой энергией и горячей водой. При этом сжигание топлива проводят при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.2$ . На рис. 2 показана принципиальная схема установки каталитического сжига-

ния фуса с получением горячей воды для теплоснабжения. Описание схемы и принципа работы установки приведено в работе [9].

При реализации технологии сжигания в промышленном масштабе актуальны вопросы экологичности технологии. В связи с этим проведен расчет выбросов вредных веществ в атмосферу для котельной мощностью 1 МВт, при каталитическом сжигании фуса Ф1 при 700 °С, при коэффициенте избытка

ТАБЛИЦА 7

Выбросы вредных веществ при каталитическом сжигании фуса Ф1 при 700 °С и предельно допустимые выбросы (ПДВ) при различных фоновых концентрациях вредных веществ  $c_{ф/г}$

Вещества	ПДВ <sub>г</sub> , г/с, при фоновых концентрациях $c_{ф/г}$			Выброс при каталитическом сжигании фуса $V_g$ , г/с
	0	0.5 ПДК	0.9 ПДК	
	NO	4.08	2.04	
NO <sub>2</sub>	0.86	0.44	0.09	$1.88 \cdot 10^{-3}$
CO	51.0	25.5	5.10	0.28
SO <sub>2</sub>	5.10	2.55	0.51	0.16
Пыль	3.05	1.53	0.31	$2.71 \cdot 10^{-3}$

воздуха  $\alpha = 1.2$  на основе результатов сжигания фуса Ф1 в автотермическом режиме в лабораторной установке (табл. 7). Здесь также приведены данные по предельно допустимым выбросам (ПДВ) при различных фоновых концентрациях вредных веществ  $c_{ф/г}$  при высоте выброса 20 м, температуре отходящих газов 120 °С и скорости выхода газов из устья 20 м/с.

Видно, что при каталитическом сжигании фуса в кипящем слое выброс вредных веществ не превышает предельно допустимый выброс даже при фоновой концентрации компонентов (на уровне 0.9ПДК).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены параметры процесса сжигания сланцевого фуса, представляющего собой смесь золы уноса и смолы, в кипящем слое алюмомеднохромового катализатора с 10 % содержанием активного компонента в автотермическом режиме. Показано, что максимальная степень выгорания фуса (97.7–97.8 %) достигается при 700–750 °С. При этом концентрация вредных веществ в отходящих газах была следующей, м. д.:  $CO$  244–269,  $NO_x$  179–229,  $SO_2$  – отсутствует. На основе анализа литературных данных по каталитическому сжиганию нефти, содержащей серу, показано, что при длительной работе установки по каталитическому сжиганию сланцевого фуса в автотермическом режиме, с учетом содержания оксида кальция в минеральной составляющей фуса, концентрация  $SO_2$  на выходе из реактора может достигать 60 м. д. Содержание углерода в зольном остатке составило 2.3–2.4 %. По содержанию  $CaO$  зола относится к основной золе уноса и может быть использована как добавка к цементам.

Определены выбросы вредных веществ в отходящих газах при использовании фуса в качестве топлива для каталитической котельной при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1.2$ . Показано, что выбросы вредных веществ при сжигании фуса не превышают значения предельно допустимых выбросов для каждого компонента, вплоть до фоновой величины (0.9ПДК).

Работа выполнена при поддержке РАН и ФАНО (проект V47.1.3).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Зеленин Н. И., Файнберг В. С., Чернышева К. Б., Химия и технология сланцевой смолы, Л.: Химия, 1968. 308 с.
- 2 Родионов А. И., Клушин В. Н., Торочешников Н. С. Техника защиты окружающей среды. М.: Химия, 1989. 512 с.
- 3 Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования. Екатеринбург: УрГУПС, 2002. 503 с.
- 4 Герасимов А. М. Совместная термохимическая переработка твердых природных энергоносителей, углеродсодержащих отходов и нефтяных остатков. Автореф. дис. ...канд. тех. наук. СПб, 2013.
- 5 Цыганков А. П., Балацкий О. Ф., Сенин В. М. Технический прогресс – химия – окружающая среда. М.: Химия, 1979. 296 с.
- 6 Боресков Г. К. Гетерогенный катализ. М.: Наука, 1986. 304 с.
- 7 Симонов А. Д., Языков Н. А., Дубинин Ю. В., Афлягунов А. С., Яковлев В. А., Пармон В. Н. // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 2/2 (120). С. 30–38.
- 8 Симонов А. Д., Языков Н. А., Ведякин П. И., Лавров Г. А., Пармон В. Н. // Химия уст. разв. 2001. Т. 9, № 1. С. 97–104.
- 9 Симонов А. Д., Федоров И. А., Дубинин Ю. В., Языков Н. А., Яковлев В. А., Пармон В. Н. // Катализ в пром-сти. 2012. № 3. С. 50–57.
- 10 Симонов А. Д., Языков Н. А., Трачук А. В., Яковлев В. А. // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 6(86). С. 61–66.
- 11 Дубинин Ю. В., Языков Н. А., Симонов А. Д., Яковлев В. А., Сараев А. А., Каичев В. В., Булавченко О. А., Ищенко А. В., Мокринский В. В., Ермаков Д. Ю. // Катализ в пром-сти. 2013. № 4. С. 68–76.
- 12 ГОСТ Р 52917–2008 (ИСО 11722:1999, ИСО 5068-2:2007) Методы определения влаги в аналитической пробе. М.: Стандартинформ, 2008. 10 с.
- 13 ГОСТ 6382–2001 (ИСО 562–98, ИСО 5071-1–97) Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. М.: Изд-во стандартов, 2001. 17 с.
- 14 ГОСТ 11022–95. (ИСО 1171–97). Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. М.: Изд-во стандартов, 1995. 8 с.
- 15 Газоанализаторы многокомпонентные “Полар”. Руководство по эксплуатации ПЛЦК.413411.001 РЭ. С-Пб: Промэкоприбор, 2010. 138 с.
- 16 Швидский В. С., Ладыгичев М. Г. Очистка газов: справ. изд. М.: Теплоэнергетик, 2002. 640 с.
- 17 Фильтры рукавные РФУ3.5 с виброотряхиванием. Паспорт 3646-001-98580472–2009. С-Пб: ЭкоФильтр, 2009. 14 с.  
URL: <http://efilter.ru/docs.html> (дата обращения 21.02.16)
- 18 “Методика расчета в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий” ОНД-86. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 68 с.
- 19 ГН 2.1.6.1338–03. Постановление от 30.05.2003 г. №114. Предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. М., 2003. 69 с.



- 20 ГОСТ 27313–95 (ИСО 1170–77). Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа для различных состояний топлива. М: Изд-во стандартов, 1995. 19 с.
- 21 Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). СПб: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. 256 с.
- 22 ГОСТ 147–95 (ИСО 1928–76) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. М: Изд-во стандартов, 1995. 49 с.
- 23 Мамыкин П. С., Левченко Т. В., Стрелов К. Х. Печи и сушила огнеупорных заводов. Свердловск: Гос. науч.-техн. изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1968. 471 с.
- 24 Эйтс Дж. Основы механики псевдооживления с приложениями. М.: Мир, 1986. 288 с.
- 25 Ватин Н. И., Петросов Д. В., Калачев А. И., Лахтинен П. // Инж.-строит. журн. 2011. № 4. С. 16–21.
- 26 ГОСТ 25818–91. Зола-уноса тепловых электростанций для бетонов. М: Изд-во стандартов, 1991. 12 с.
- 27 Yazykov N. A., Dubinin Yu. V., Simonov A. D., Reshetnikov S. I., Yakovlev V. A. // Chem. Eng. J. 2016. Vol. 283. P. 649–655.
- 28 Реми Г. Курс неорганической химии. Т. 1. М: Изд-во иностр. лит., 1963. 920 с.

