

УДК 629.123:665.61

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К ТОПЛИВУ, СЖИГАЕМОМУ В ПАРОВОМ КОТЛЕ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ; В.А. ДРОНЧЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматривается проблема утилизации нефтесодержащих отходов. Представлен способ решения проблемы – сжигание сильно обводненных горючих отходов нефтепродуктов с топливом в паровом котле. Показано, что при равномерном распределении воды по всему объему материала обеспечивается снижение выбросов вредных веществ по сравнению с их количеством при сжигании основного топлива. Подтверждена возможность и эффективность использования нефтесодержащих отходов производства в виде водотопливной эмульсии как добавки к топливу котельных установок.

Ключевые слова: нефтесодержащие отходы, эмульсия, сжигание, вредные выбросы в атмосферу.

Введение. На предприятии, связанном с ремонтом оборудования и машин, в течение года образуется до 20 тыс. т нефтесодержащих сточных вод в виде отходов разборочно-очистного участка, обработки резанием заготовок, обкаточно-испытательного и других. В жидких стоках содержатся: моторные и трансмиссионные масла; консистентные смазки; топливные фракции; смазочно-охлаждающие жидкости; технические моющие средства; промывочные жидкости; другие. Наибольшая доля жидких нефтяных отходов образуется при разборке агрегатов. Эти отходы включают (% объема): масла моторные 65...90; масла трансмиссионные 6...10; топливные фракции 2...6; консистентные смазки 1...2. Только загрязненные вод отработанными нефтяными маслами составляет 20% общего техногенного загрязнения.

В качестве комплексного решения в части исключения вредного влияния на здоровье рабочих и окружающую среду нефтесодержащих отходов предприятия предложена их переработка и утилизация. Переработка предполагает превращение отходов в неопасные соединения путем эмульгирования, а утилизация – использование полученных эмульсий в виде добавки к топливу котельных агрегатов.

Материалы и оборудование. Основой для приготовления эмульсии как добавки к топливу служили нефтесодержащие отходы и растворы отработанных технических моющих средств. Эмульсия получена с помощью гидродинамического излучателя в специальной установке [1; 2]. Подогретая до температуры 90 °С эмульсия сжигалась с газообразным топливом в котле ДКВр-6,5-13 ГМ (рис. 1), который имеет номинальную паропроизводительность 6,5 т/ч под давлением 1,26 МПа. Котел оборудован экономайзером ЭП-1-330 и дутьевым вентилятором ВД-10. Температура пламени измерялась с помощью платинородиевой термопары ТПР, температура дымовых газов – с помощью термоэлектрического пирометра ТХВА, длина пламени – при помощи модели стальной линейки, а содержание вредных составляющих в дымовых газах – анализатором «Testo-350».



Рисунок 1. – Котел ДКВр-6,5-13 ГМ, оборудованный для сжигания природного газа

Основная часть. В ходе исследования проведено шесть серий экспериментов. В каждой серии эксперименты проведены с эмульсией, влагосодержание которой составляло $w = 0; 5; 10; 15; 20$ и 25% .

Результаты изучения влияния влагосодержания эмульсии на температуру среды факела и на концентрацию вредных продуктов горения в дымовых газах котла представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. – Влияние содержания воды в эмульсии с топливом на КПД котла и температуру среды факела и уходящих газов при номинальной нагрузке котла

Содержание воды в эмульсии, %	КПД котла, %				Температура факела, К				Температура уходящих газов, К			
	<i>Эксперименты</i>											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
0	84,1	82,6	81,0	78,3	1958	1928	1925	1941	423,4	423,9	424,0	423,9
5	82,3	81,2	79,6	81,4	1933	1918	1894	1898	422,2	422,5	423,1	422,5
10	78,7	80,9	81,0	83,2	1908	1916	1893	1892	420,8	421,4	421,7	421,6
15	80,8	84,0	80,9	77,7	1893	1823	1856	1889	419,3	420,0	420,7	419,9
20	80,5	82,3	80,7	79,8	1808	1818	1815	1793	418,7	419,3	419,1	418,9
25	80,0	84,8	82,1	76,8	1799	1787	1791	1787	417,5	416,8	416,2	416,6

Таблица 2. – Влияние содержания воды в эмульсии с топливом и коэффициента избытка воздуха на концентрацию вредных продуктов горения в дымовых газах котла при номинальной нагрузке

Содержание воды в эмульсии, %	Коэффициент избытка воздуха	Концентрация оксидов азота, C_{NOx} , мг/м ³			
		<i>Эксперименты</i>			
		1	2	3	4
0	1,05	215	255	248	237
	1,20	327	317	316	323
5	1,05	186	176	193	205
	1,20	258	273	239	254
10	1,05	168	154	143	151
	1,20	196	235	250	229
15	1,05	134	127	138	142
	1,20	209	178	191	184
20	1,05	129	127	116	131
	1,20	207	177	185	183
25	1,05	121	113	128	131
	1,20	214	161	220	187

Результаты исследований влияния влагосодержания эмульсии на температуру и длину факела представлены на рисунках 2 и 3, на основании которых получены полиномиальные регрессионные зависимости:

- квадратичная для температуры факела T_{ϕ} (°C) (рис. 2)

$$T_{\phi} = -2354,3 w^2 - 112,3w + 1665,5; \quad (1)$$

- кубическая для отношения размеров пламени (рис. 3),

$$l_{\text{в}} / l_0 = 63,20w^3 - 18,46w^2 - 0,19w + 1,00, \quad (2)$$

где $l_{\text{в}}$ – длина факела при сжигании топлива с добавлением эмульсии; l_0 – длина факела при сгорании обезвоженного топлива.

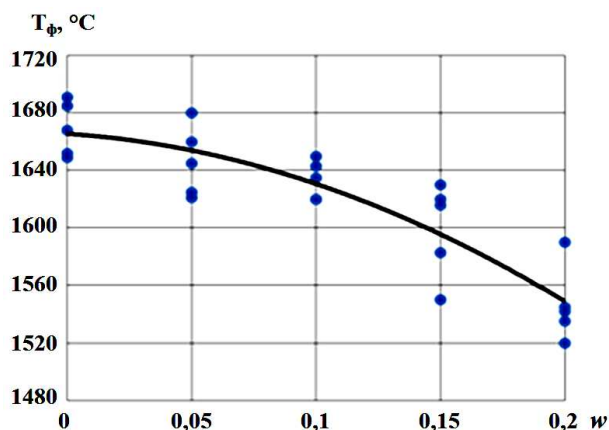


Рисунок 2. – Влияние влагосодержания эмульсии w на температуру факела T_{ϕ}

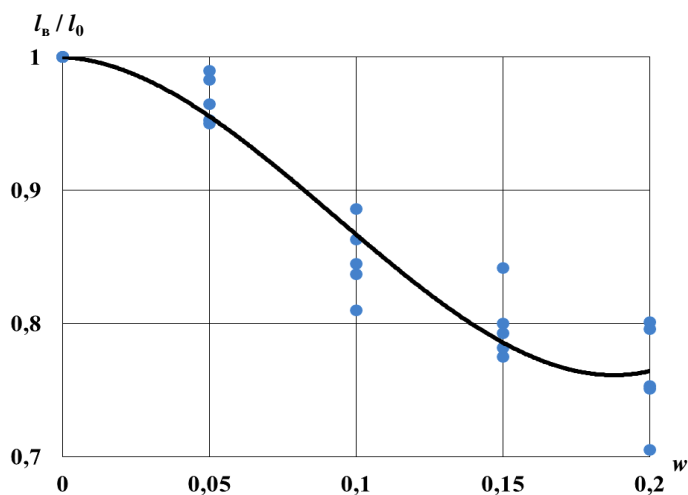


Рисунок 3. – Зависимость относительной длины факела $I_{\text{в}} / I_0$ от влагосодержания эмульсии w

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии проводилась по t -критерию Стьюдента при 5%-ном уровне значимости. Определены доверительные интервалы Δ_b (табл. 3). Адекватность уравнений регрессии (1) и (2) проверена с помощью критерия Фишера при уровне значимости 5%. Для уравнений вычислены расчетные значения критерия F_p , которые сопоставлены с табличными значениями F_T .

Таблица 3. – Проверка адекватности уравнений регрессии и значимости их коэффициентов

№ уравнения	F_T	F_p	t	Квадратичная ошибка коэффициента регрессии s_k	Δ_b
(1)	2,87	18,43	2,086	10,67	$\pm 22,298$
(2)	3,24	43,27	2,131	0,02135	$\pm 0,04553$

Сравнение значений коэффициентов уравнений регрессии с их доверительным интервалом свидетельствовало о том, что все они значимы. Сравнение расчетных значений F -критерия с его табличными значениями подтвердило возможность интерпретации полученных зависимостей.

Анализ экспериментальных данных показал, что содержание 10% воды в эмульсии от объема смеси обуславливает снижение температуры факела примерно на 30...50 °С, а содержание воды 20% – на 100...120 °С. В результате уменьшения температуры факела можно снизить и содержание оксидов азота NO_x в дымовых газах. Для малых значений w изменение температуры прямо пропорционально изменению выделившейся при сгорании теплоты.

Следует отметить, что при малых значениях w разрыв капле может наступить за счет испарения топлива с их поверхности и результирующего уменьшения толщины внешней пленки. Другим механизмом, способным вызвать такой «задержанный» разрыв, является увеличение температуры испарения за счет выгорания летучих компонентов. Это можно учесть в рамках модели термического разрушения капле водотопливной эмульсии. Кроме этого дополнения, модель может быть уточнена за счет рассмотрения зависимости теплопроводности, теплоемкости и плотности материала капли от содержания паров внутри ее, а также учета увеличения ее радиуса, которое влияет, в частности, на силу аэродинамического сопротивления и теплообмен с окружающей средой. Снижение порогового значения микровзрыва достигается уменьшением прочности поверхностной пленки капли. Один из возможных путей достижения этого – добавление нефтесодержащих сточных вод, что позволит уменьшить однородность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения внешней пленки, а следовательно её прочность.

При увеличении влагосодержания топливной смеси уменьшается относительная длина факела l_v / l_0 (см. рис. 3). Это объясняется тем, что при дроблении парами воды капле эмульсии их фрагменты разлетаются в разные стороны, поперечные размеры факела увеличиваются при одновременном сокращении длины факела, однако объем факела практически не изменяется. Уменьшение длины факела ведет к уменьшению времени пребывания продуктов сгорания в высокотемпературной зоне, что объясняет снижение оксидов азота NO_x в дымовых газах.

Таким образом, добавление к топливу, сжигаемому в котельных установках, мелкодисперсной эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих отходов и растворов технических моющих средств повышает влагосодержание топлива, уменьшая тем самым температуру и длину факела, что позволяет не только утилизировать отходы, но и снизить содержание оксидов азота NO_x в дымовых газах [3; 4].

Оксиды азота при высокой температуре образуют ряд термодинамической устойчивости: NO , N_2O , NO_2 , N_2O_3 , N_2 . В образовании оксидов участвуют как азот воздуха, так и органические соединения азота с топливом. На образование оксидов азота влияют катализаторы – различные соединения минеральной или минерально-органической составляющей топлива [5]. К увеличению образования NO_x приводят рост мощности горелок и нагрузки котла, повышение температуры среды в топке.

Доля оксидов азота в отработавших газах котла растет при коэффициенте избытка воздуха за счет снижения температуры среды в топке из-за разбавления дымовых газов воздухом [6]. Поступающий с дымовыми газами в атмосферу NO окисляется до диоксида азота NO_2 , вступает в реакцию с атмосферной влагой и выпадает с осадками в виде слабого раствора азотной кислоты HNO_3 , растворяясь в водах. На образование NO_2 при коэффициенте избытка воздуха 1,1 и температуре уходящих газов 200 °C требуется 35 мин, поэтому он практически не образуется в газовом такте котла. Геминитрид N_2O термически неустойчив, а доли димера диоксида N_2O_4 и триоксида N_2O_3 очень малы, чтобы их учитывать при исследовании токсичных выбросов котлов. Основная доля оксидов азота, образующихся в топке котла, обусловлена высокой температурой среды в зоне горения и наличием окислителя. Механизм образования оксидов азота различных видов представлен в работах [6; 7].

В долю вредных выбросов в составе дымовых газов также входят оксиды азота, образующиеся из химически связанного азота топлива. Топливный азот через радикалы частично окисляется до оксидов азота. На отделение атомов азота от элементов топлива затрачивается в 1,5...4,0 раза меньше энергии, чем на диссоциацию молекулы азота из воздуха. Вследствие малой энергии активации образование NO происходит при относительно низкой температуре [8]. Скорость образования NO_x из азота топлива имеет слабую зависимость от температуры среды и обнаруживается уже в начальной части факела при температуре около 1000 К [5]. При этом влияние концентрации кислорода на образование NO_x более существенно – оно проявляется примерно в квадратичной зависимости.

Вторичный энергоресурс, получаемый из нефтесодержащих отходов, имеет высокую теплотворную способность в сравнении с другими видами топлива (табл. 4).

Таблица 4. – Элементный состав (% масс.) и теплотворная способность эмульсии и топлива

Топливо	С	Н	S	О	N	Теплотворная способность	
						МДж/кг	МДж/м ³
Эмульсия	80,2	9,8	0,4	0,4	0,3	41,0	–
Печное топливо	79,5	9,5	0,5...1,1	0,4	0,3	39,5	–
Газ природный	72,5	23,5	0...0,3	0,4	0,5...3,5	–	33,5
Мазут топочный	83,5	10,2	0,7	0,4	0,3	38,9	–
Мазут малосернистый 100	85,8	10,7	0,2	0,4	0,4	39,2	–

Термическая утилизация нефтесодержащих отходов может производиться путем их сжигания с мазутом, печным топливом или природным газом. Балансовыми испытаниями парового котла ДКВР 6,5-13 установлено следующее. При подаче воздуха в горелки с расходом $637 \text{ м}^3/\text{ч}$ под давлением 1,9 кПа (нагрузка близка к номинальной) концентрация оксидов азота изменялась от 145 до $170 \text{ мг}/\text{м}^3$ (в пересчете на NO_2 в сухих газах при стандартных условиях: 101,3 кПа, 273 К и 6% O_2) в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Средняя концентрация C_{NO_2} оказалась равной $160 \text{ мг}/\text{м}^3$. Этому значению соответствует масса выбросов $M_{\text{NO}_2} = 0,35 \text{ г}/\text{с}$. Концентрация NO_x зависит от нагрузки котла, по мере снижения которой происходит уменьшение содержания оксидов азота в дымовых газах с 160...200 $\text{мг}/\text{м}^3$ до 110...140 $\text{мг}/\text{м}^3$.

В ходе исследования *установлено влияние:*

- коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1,05; 1,10; 1,15; 1,20$) на выброс оксидов азота с дымовыми газами котла при термической утилизации эмульсии при нагрузке котла, % от номинальной: 50, 75, 100;
- содержания воды ($w = 0; 5; 10; 20; 25 \%$) в эмульсии на выход оксидов азота и оксида углерода при номинальной нагрузке котла;
- содержания воды ($w = 0; 5; 10; 20; 25 \%$) в эмульсии на КПД котла, температуру факела и температуру уходящих газов за экономайзером.

Для поиска режима работы котла без химического недожога и с наименьшими выбросами оксидов азота в атмосферу проводились эксперименты по сжиганию эмульсии влажностью 10 % с топливом на режимах 50, 75 и 100% мощности котла. Значение коэффициента избытка воздуха изменялось от 1,05 до 1,20 (табл. 5). При этом установлено снижение потребления основного топлива котельной на 3...5 %.

Таблица 5. – Содержание оксидов азота в дымовых газах в зависимости от коэффициента избытка воздуха при сжигании нефтесодержащей эмульсии при различной нагрузке котла ($w = 10\%$)

Нагрузка котла, %	Коэффициент избытка воздуха	Содержание оксидов азота, $\text{мг}/\text{м}^3$			
		Эксперименты			
		1	2	3	4
50	1,05	108	97	109	114
	1,10	128	118	130	139
	1,15	144	158	149	137
	1,20	155	157	149	162
75	1,05	149	152	158	150
	1,10	183	189	181	173
	1,15	201	197	200	204
	1,20	211	209	216	214
100	1,05	173	202	184	181
	1,10	203	214	217	231
	1,15	256	248	243	241
	1,20	257	265	251	255

Уравнение регрессии зависимости выхода оксидов азота NO_x от мощности котла M (%) и коэффициента избытка воздуха α следующее:

$$\text{NO}_x = -2580,531 + 183,375M + 4269,833\alpha - 1716,667\alpha^2. \quad (3)$$

Концентрация NO_x в дымовых газах падает со снижением α . Приравняв к нулю производную от оксидов азота по коэффициенту избытка воздуха $d\text{NO}_x / d\alpha = 4269,833 - 2 \cdot 1716,667\alpha = 0$, получим $\alpha = 1,24$, при котором образование NO_x максимальное.

Заключение. Увеличение содержания воды в нефтесодержащей эмульсии до 10% приводит к уменьшению длины факела в 1,1...1,3 раза, а при содержании воды 20% – в 1,2...1,6 раза, со снижением температуры факела на 30...50 К и 100...120 К соответственно, что обуславливает снижение содержания оксидов азота в дымовых газах на 28...45%.

Сжигание сильно обводненных горючих отходов нефтепродуктов (15% воды) с топливом при равномерном распределении воды по всему объему материала в котле ДКВР-6,5-13 обеспечивает снижение выбросов токсичных веществ по сравнению с их количеством при сжигании печного топлива. Горючие

добавки в виде вторичного энергоресурса из нефтяных фракций сточных вод позволяют уменьшить потребление основного топлива котельной на 3...5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В.П. Разрушение поверхности раздела двух несмешивающихся жидкостей при эмульгировании / В.П. Иванов, В.А. Дронченко // Вестн. БрГТУ. – 2014. – № 4 (88) : Машиностроение. – С. 38–42.
2. Дронченко, В.А. Влияние содержания воды на стабильность эмульсии на основе отработавших нефтесодержащих продуктов / В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2015. – № 11. – С. 82–86.
3. Цирульников, Л.М. Пути уменьшения образования токсичных и агрессивных продуктов сгорания природного газа и мазута / Л.М. Цирульников. – М. : ВНИИЭгазпром, 1980. – 36 с.
4. Семенов, В.И. Снижение выбросов оксидов азота при работе котельных установок / В.И. Семенов, В.А. Дронченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 186–190.
5. Лорнер, М.О. Горение и экология / М.О. Лорнер. – М. : Энергоиздат, 1982. – 177 с.
6. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – М. : Наука, 1974. – 217 с.
7. Исаев, Л.А. Сокращение выбросов оксидов азота при сжигании угля / Л.А. Исаев, Г.Н. Делягин // Промышленная энергетика. – 1996. – № 6. – С. 44–48.
8. Работы ВТИ по снижению выбросов оксидов азота технологическими методами / Ю.П. Енякин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1991. – № 6. – С. 33–38.

Поступила 02.12.2016

**DISPOSAL OF OILY WASTE BURNING
AS AN ADDITIVE TO FUEL STEAM BOILER**

V. IVANOV, V. DRONCHENKO

Deals with the disposal of oily waste combustion in a steam boiler. Burning very wet combustible waste petroleum products with fuels with a uniform distribution of water throughout the volume of material provides a reduction in emissions of harmful substances compared to their number when burning primary fuel. Confirmed the possibility and efficiency of using oil-contaminated production wastes in the form of water-fuel emulsion as an additive to fuel boilers.

Keywords: waste oils, emulsion, combustion, harmful emissions into the atmosphere.