

УДК 628.339.063

## СНИЖЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПУТЕМ ТЕРМИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ВОДО-ТОПЛИВНОЙ ЭМУЛЬСИИ

В. П. ИВАНОВ<sup>1</sup>, В. В. ДОМОРАЦКИЙ<sup>2+</sup><sup>1</sup> ОАО Полоцкий завод «Проммашремонт», ул. Ленинградская 101, 211408 г. Полоцк, Беларусь.<sup>2</sup> Полоцкий государственный университет, ул. Блохина 29, 211440 г. Новополоцк, Беларусь.

*Рассмотрена технология получения водо-топливной эмульсии в виде смеси топочного мазута с нефтефракциями сточных вод. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса горения водо-топливных смесей. Выявлено влияние добавок из нефтесодержащих сточных вод к топочному мазуту на уменьшение содержания оксидов азота в дымовых газах котлоагрегата.*

### Введение

Снижение загрязнения окружающей среды и рациональное использование топливно-энергетических ресурсов являются актуальной задачей. На ремонтных предприятиях ежегодно образуется до 800 тыс. т нефтесодержащих сточных вод (НССВ), содержащих до 1100 мг/л таких нефтепродуктов как: моторные и трансмиссионные масла, консистентные смазки, топливные фракции, СОЖ, промывочные жидкости и др.

Локальные очистные сооружения предприятий зачастую сбрасывают недоочищенные воды с концентрациями нефтепродуктов 0,7–1,9 мг/л. Воздушный бассейн загрязняется вредными продуктами сгорания жидкого топлива – мазута, сжигаемого в производственных котельных. Наиболее опасными компонентами дымовых газов котлов являются оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ). Снижение их выброса может быть достигнуто снижением максимальных температур факела котла, сжиганием топлива при пониженных значениях коэффициента избытка воздуха или сокращением времени пребывания продуктов горения в высокотемпературной зоне [1]. Снижение загрязнения водного бассейна может быть достигнуто уменьшением объемов сброса сточных вод путем приготовления из них вторичного энергоресурса и использования его в качестве добавки к топочному мазуту. Наличие воды в топливной смеси мазута с вторичным энергоресурсом приводит к уменьшению выброса оксидов азота с дымовыми газами в атмосферу [2].

Вода в жидком топливе оказывает благоприятное воздействие на процесс горения. Внешние

оболочки капель водо-топливной эмульсии (ВТЭ) разрываются парами вскипающей воды на множество осколков, что увеличивает площадь соприкосновения топлива с окислителем и теплообмен между факелом и теплоносителем. Хотя в работе [3] отмечено, что микровзрыв капли происходит один раз, а температура факела не зависит от влагосодержания ВТЭ, однако проведенные исследования не подтвердили эти допущения.

### Цель работы

Цель работы заключалась в разработке технологии приготовления водо-топливной эмульсии в виде смеси нефтефракций сточных вод с мазутом, исследовании процесса горения полученного синтетического топлива для выявления влияния добавок к топочному мазуту на содержание оксидов азота в дымовых газах парового котла.

### Технология приготовления и термической утилизации водо-топливной эмульсии

Способ получения водо-топливной эмульсии включает сбор НССВ, их отстаивание в емкости 1 (рис. 1) и слив отстаившейся воды. Отстоявшиеся обводненные нефтефракции сточных вод порциями перекачиваются в рабочую емкость 3, где осуществляется их эмульгирование пневматическим излучателем 2. Пневматический излучатель создает в жидкой среде за счет выхлопов сжатого воздуха ударные волны с давлением за фронтом волны 2,5–3,0 МПа [4]. Возбуждаемые по всему объему жидкости низкочастотные колебания приводят к

+ Автор, с которым следует вести переписку.

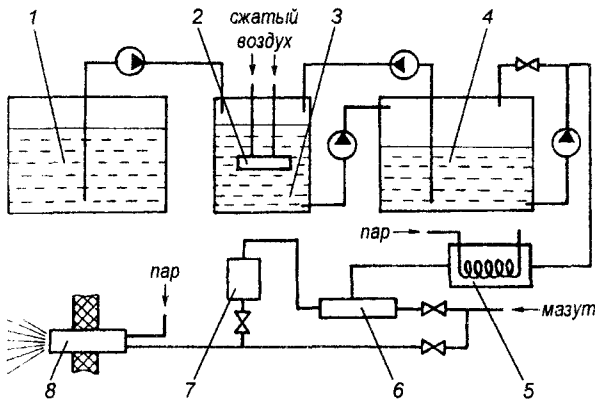


Рис. 1. Схема получения водо-топливной эмульсии: 1 – емкость для отстаивания НССВ; 2 – пневматический излучатель; 3 – рабочая емкость; 4 – накопительный бак; 5 – подогреватель; 6 – эжектор-дозатор; 7 – роторный эмульгатор; 8 – форсунка котла

эмульгированию компонентов вторичного энергоресурса. Полученный эмульсол НССВ перекачивается в накопительный бак 4. Перед термической утилизацией эмульсол разогревается в промежуточном подогревателе 5 и эжектируется магистральным мазутом в эжекторе-дозаторе 6. Использование эжектора-дозатора позволяет автоматически поддерживать заранее заданное соотношение мазут/эмульсол при изменении давления мазута, подаваемого на сжигание. Далее смесь поступает в роторный эмульгатор 7, где происходит ее окончательное эмульгирование при прохождении через отверстия перфорированных цилиндров ротора и статора. Полученная ВТЭ подается в форсунку 8, распыляется и сгорает в факеле котлоагрегата.

Содержание воды в эмульсоле НССВ может составлять 10–60%, объем эмульсола в ВТЭ может достигать 40% от общего объема топливной смеси [5]. На способ получения ВТЭ подана заявка на изобретение Республики Беларусь.

### Исследование процесса сжигания водо-топливной эмульсии

Выявление всех особенностей горения ВТЭ является довольно сложной задачей, поскольку водяной пар влияет на температуру факела, изменение размеров капель топлива и химические превращения продуктов горения. По своим теплотехническим характеристикам ВТЭ отличается от обезвоженного мазута. Так, теплопроводность капли ВТЭ  $\lambda$  зависит не только от коэффициентов теплопроводности мазута и воды  $\lambda_m$  и  $\lambda_b$ , но и от влагосодержания топливной смеси  $W$ :

$$\lambda = \left\{ \lambda_m \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3\lambda_m^2}{2\lambda_m\lambda_b + \lambda_b^2} \right) W \right] \right\} / \left[ 1 + \left( \frac{3\lambda_m}{2\lambda_m + \lambda_b} - 1 \right) W \right]$$

Зависимость теплообмена капли ВТЭ с окружающей средой в зоне горения выражается формулой:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где  $c$ ,  $\rho$  – теплоемкость и плотность капли ВТЭ;  $T$  – температура факела;  $\tau$  – время горения капли;  $r$  – радиус капли.

Изменение радиуса капли ВТЭ при ее нагревании подчиняется зависимости

$$\frac{dr}{d\tau} = \frac{1 + k_2(T - T_1)}{\rho k} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial r} - \alpha(T_g - T) \right],$$

где  $k_2$  – параметр, управляющий скоростью срыва внешней оболочки капли парами вскипающей воды;  $k$  – удельная теплота испарения эмульсии;  $T_1$  – температура окончания микровзрыва;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_g$  – температура газа.

Начало срыва внешней оболочки капли произойдет, когда силы давления водяных паров внутри капли превысят силы поверхностного натяжения ее оболочки. В качестве нормирующей величины, учитывающей размер капли, принимаем значение  $r^n$ , где  $2 < n < 3$ , поскольку масса тонкого поверхностного слоя капли пропорциональна квадрату радиуса, а масса всей капли – радиусу в третьей степени. Критерий начала срыва оболочки капли можно представить в виде:

$$q = \frac{k_p W}{r^n} \int (T - 373) r^2 dr \geq q_0,$$

где  $k_p = [W\rho_b c_b + (1 - W)(\rho_m c_m + \rho_b c_b) + (W - 2)\rho_m c_m] / k$ ; индексы «м» и «в» указывают к какой компоненте эмульсии относятся параметры; интеграл берется по области капли, для которой температура больше температуры кипения воды;  $q_0$  – критическое значение критерия. Температура окончания микровзрыва находится в пределах  $363 < T_1 < 373$  К.

Нагрев капли происходит неоднородно по всему объему. После первого срыва внешней оболочки более глубокие слои капли прогреваются интенсивнее. При достижении последующими слоями температуры кипения воды и превышении критического значения критерия  $q_0$  происходят дальнейшие микровзрывы капли, число которых достигает 3–5 раз.

Сжигание водо-топливной смеси из топочного мазута с добавками обводненных нефтефракций сточных вод осуществлялось в котлоагрегате ДКВР 6,5-13 котельной ОАО Полоцкого завода «Проммашремонт». Экспериментальные исследования проводились при значениях коэффициента избытка воздуха 1,05–1,15 и режимах нагрузки котла 100, 75 и 50% от номинальной мощности, с влагосодержанием топлива в пределах  $0 < W < 25\%$ . Измерения температур факела котла производи-

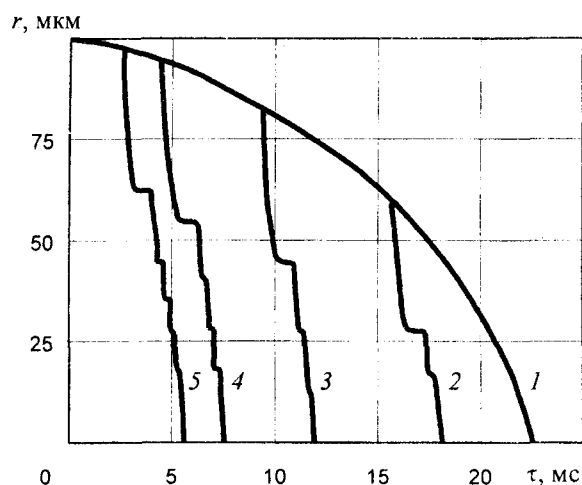


Рис. 2. Зависимость радиуса капли  $r$  от времени горения  $t$  при влажосодержании водо-топливной эмульсии: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20%

лись с помощью платинородиевой термопары типа ТПР, измерения содержания оксидов азота в дымовых газах котла – анализатором дымовых газов «TESTO 350».

#### Результаты экспериментов и их обсуждение

Экспериментальные исследования получения вторичных энергоресурсов из НССВ показали, что применение пневматического излучателя в качестве эмульгирующего устройства позволяет получать эмульсол нефтесодержащих фракций сточных вод, обладающий высокой дисперсностью с диаметром капель 1–5 мкм. Высокая дисперсность эмульсола обуславливает его повышенную стабильность – до 30 дней при влажосодержании смеси 15% и температуре хранения 291 К, что позволяет заготавливать эмульсол заранее и в дальнейшем использовать его для получения ВТЭ. Двухстадийное эмульгирование смеси эмульсола НССВ с топочным мазутом при ее прохождении через эжектор-дозатор и роторный эмульгатор обуславливает равномерное распределение вторичного энергоресурса по всему объему топлива. Разработанный способ позволяет получить дисперсность ВТЭ в пределах 8–20 мкм, что обеспечивает надежность работы котельного агрегата и устойчивое горение топливной смеси при различных мощностных режимах. Технология приготовления и термической утилизации вторичных энергоресурсов из НССВ позволяет снизить объемы сточных вод предприятия на 10–15% от объема сжигаемого мазута. Сжигание горючих нефтефракций сточных вод позволяет не только компенсировать расход топлива на испарение воды в ВТЭ, но и достичь 3–5% экономии мазута.

Математическое исследование процесса горения ВТЭ в факеле котла показало, что влажосодержание топливной смеси влияет на время сгорания топлива (рис. 2). Увеличение объема воды в

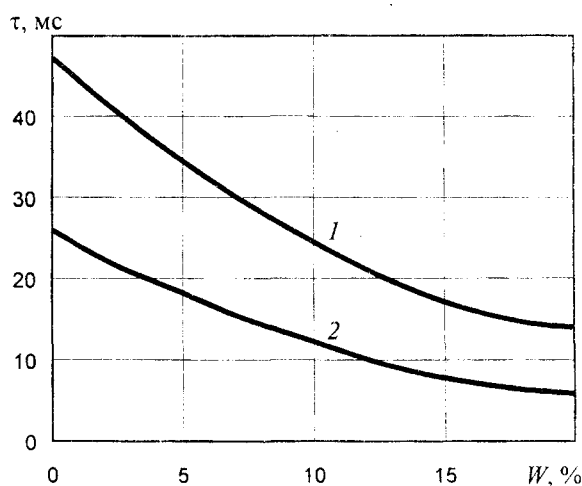


Рис. 3. Зависимость времени сгорания  $t$  капель ВТЭ от влажосодержания топливной смеси  $W$  для капель с радиусом: 1 – 150; 2 – 100 мкм

топливе приводит к сокращению времени сгорания капель и росту числа их последовательных микровзрывов (вертикальные участки кривых). Время прогревания и испарения поверхностных слоев капель (горизонтальные участки) и временные промежутки между последовательными срывами их внешних оболочек уменьшаются по мере уменьшения радиуса капель. Увеличение влажосодержания топлива до 5–20% от объема топливной смеси приводит к сокращению времени горения капель в 1,3–3,5 раза (рис. 3).

Водяной пар в топке котла существенно влияет на температуру горения. Добавление 10–20% воды от объема топлива снижает температуру факела на 50–100 К (рис. 4). Понижение максимальных температур факела ВТЭ обуславливает уменьшение содержания оксидов азота в дымовых газах т. к. образование  $\text{NO}_x$  протекает в зоне наиболее высоких температур и заканчивается одновременно с завершением процесса горения. Таким

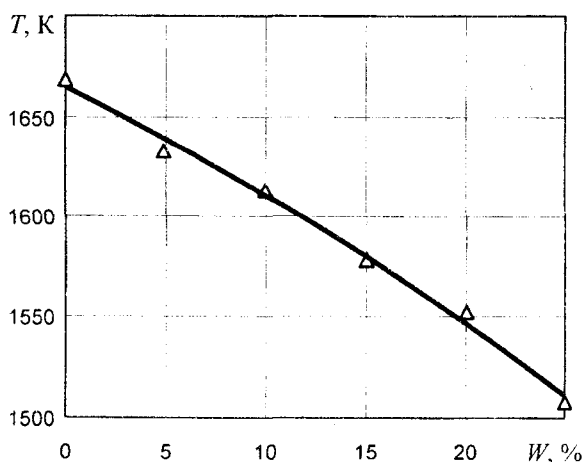


Рис. 4. Влияние влажосодержания  $W$  топливной смеси на температуру в зоне горения  $T$

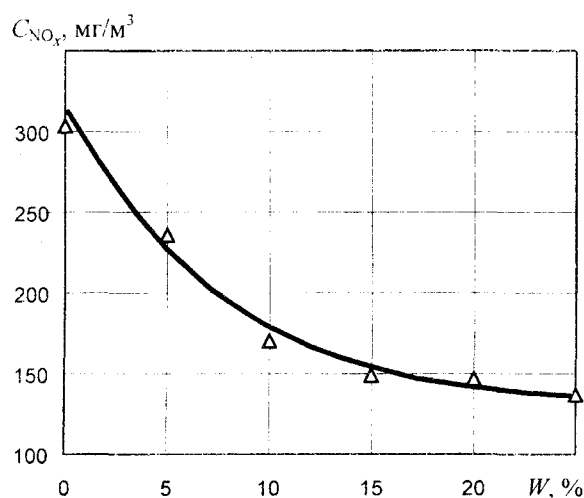


Рис. 5. Влияние влагосодержания ВТЭ на содержание оксидов азота в дымовых газах котла ДКВР 6,5-13

образом, эмульгированная вода в жидком топливе приводит к дополнительному дроблению капель ВТЭ в факеле котла, сокращению времени пребывания продуктов горения в высокотемпературной зоне и снижению максимальных температур факела, что в совокупности обеспечивает снижение содержания оксидов азота в дымовых газах котлоагрегата. Сжигание ВТЭ с влагосодержанием 12% позволяет снизить содержание  $NO_x$  на 42% (рис. 5).

Технология получения и термической утилизации вторичных энергоресурсов из НССВ может быть использована для экологической модернизации котельных агрегатов малой и средней паропроизводительности.

### Выводы

Способ приготовления водо-топливной эмульсии с использованием пневматического излучателя, эжектора-дозатора и роторного эмульгатора позволяет получать синтетическое топливо с равномерно распределенными по объему смеси фракциями и дисперсностью эмульсии в пределах

8–20 мкм. Технология термоутилизации вторичных энергоресурсов из НССВ позволяет уменьшить объем сточных вод предприятия на 10–15% от объема сжигаемого мазута. Наличие диспергированной воды в ВТЭ приводит к сокращению максимальных температур факела на 50–100 К и, как следствие, к уменьшению на 42% оксидов азота, выбрасываемых в атмосферу с дымовыми газами котла.

### Обозначения

$T$  – температура факела;  $W$  – влагосодержание водо-топливной эмульсии;  $\lambda$  – теплопроводность капли ВТЭ;  $\lambda_m, \lambda_v$  – коэффициенты теплопроводности мазута и воды;  $c$  – теплоемкость материала капли;  $\rho$  – плотность материала капли;  $\tau$  – время горения;  $r$  – радиус капли;  $k_2$  – параметр, управляющий скоростью микровзрыва капли;  $k$  – удельная теплота испарения ВТЭ;  $T_1$  – температура, при которой оканчивается микровзрыв;  $T_g$  – температура газа;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $q$  – критерий начала срыва внешней оболочки капли;  $q_0$  – критическое значение критерия;  $C_{NO_x}$  – содержание оксидов азота.

### Литература

1. Белосельский Б. С. Топочные мазуты. Москва: Энергия (1978)
2. Роев Г. А., Юфин В. А. Очистка сточных вод и вторичное использование нефтепродуктов. Москва: Недра (1987)
3. Селезнев Ю. С., Лапин А. М., Суменков В. М. Модель факела водотопливной эмульсии в топке парогенератора // Сибирский физико-технический журнал (1991), вып. 5, 115
4. Коробко В. И., Семенов В. И., Иванов В. П. Погружная очистка деталей и утилизация отходов автотранспортных и авторемонтных предприятий. Полоцк: ПП «Наследие Ф. Скоринь» (1997)
5. Доморацкий В. В. Использование нефтесодержащих сточных вод промышленных предприятий в качестве вторичных энергоресурсов // Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии. Гродно (1997), ч. 2, 192–196

Ivanov V. P., Domoratskiy V. V.

#### Reducing an environment pollution by incineration of water-fuel emulsion.

The technology of obtaining the water-fuel emulsion as a mixture of boiler's fuel with oil of waste water is described. Theoretical and experimental investigations of the water-fuel emulsion burning have been carried out. The influence of the oil wastes added to boiler's fuel on reduction of nitrogen oxide content in the combustion gas has been studied.

Поступила в редакцию 24.05.99.

© В. П. Иванов, В. В. Доморацкий, 1999.