

УДК 621.18-64

С. В. ГРИДИН (канд. техн. наук, доц.), М. Н. ШАФОРОСТОВА (канд. наук гос. упр., доц.),  
А. Л. ХОХЛОВА (магистрант)

Донецкий национальный технический университет

### АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ ВОДО-МАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ

*Рассмотрено влияние влаги, содержащейся в водо-мазутной эмульсии на эмиссию оксидов азота, серы и других вредных веществ, представлены результаты экспериментальных исследований влияния содержания воды в водо-мазутной эмульсии на экологическую безопасность теплоэнергетического оборудования.*

*водо-мазутная эмульсия, эмиссия, дисперсность, микровзрыв*

*Постановка проблемы.* Современный масштаб техногенного давления на окружающую среду принял катастрофические размеры, поэтому научно обоснованные предложения по снижению такого воздействия следует причислить к актуальнейшим задачам сегодняшнего дня.

Предприятия, использующие в своей хозяйственной деятельности мазут в качестве топлива, являются крупными источниками загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов. В результате хозяйственной деятельности в атмосферу поступают следующие загрязняющие вещества: канцерогенные углеводороды, токсичные оксиды азота, оксид углерода, диоксид серы, твердые частицы и др. Вредное воздействие на окружающую среду усиливается тем, что эти источники загрязнений располагаются в жилых районах, в которых проживает население.

В Законе Украины «Об охране окружающей природной среды» [1] особое внимание обращается на необходимость использования технологических процессов и схем на основе малоотходных и безотходных технологий, которые бы максимально снизили или полностью исключили загрязнение природной среды. При этом главной задачей является снижение образования вредных веществ непосредственно в источнике их возникновения.

Анализ современных технологических методов снижения выбросов вредных веществ, влияющих на окружающую природную среду, показывает, что комплексным характером подавления вредных выбросов обладает метод использования жидкого топлива в виде водо-мазутных эмульсий (ВМЭ).

*Целью статьи* является исследование влияния воды в составе ВМЭ на эмиссию вредных веществ, образующихся в процессе сгорания.

*Материалы и обсуждение.* При горении обводненных нефтепродуктов происходят сложные физико-химические превращения. Отличительной особенностью сжигаемых ВМЭ является наличие в зоне пламени водяных паров. При этом их появление вызвано процессом химического превращения, так как вода вводится в камеру горения с топливом еще до воспламенения горючей смеси.

Согласно современной теории горения и цепных реакций можно считать, что наличие воды в ВМЭ и соответственно повышенное содержание водяных паров как в свежей горючей смеси, так и в продуктах сгорания должно положительно сказываться на процессе горения и, в первую очередь, на скорости распространения пламени.

Появление в зоне пламени обводненного топлива большого числа активных центров атомарного водорода Н и гидроксида ОН может во много раз ускорить реакции окисления и горения углеводородного топлива в результате развития реакции по цепочно-тепловому механизму [2].

Ускоряющее действие водяных паров в процессе горения окиси углерода объясняется суммарной реакцией:



в результате которой возникает легковоспламеняющийся водород. Последующее гомогенное окисление водорода приводит к образованию радикалов ОН и атомов Н и О, обуславливающих как развитие цепей основной реакции путем процессов:



так и их разветвления:



или



Этим объясняется повышение скорости горения  $\text{CO}$ , которое всегда имеет место в присутствии водяного пара. Вода не только является инициатором цепей в реакции, но и участвует в развитии самих цепей. Это подтверждается изменением интенсивности свечения, которое наблюдается с увеличением содержания воды в смеси.

При сжигании обводненных углеводородов уменьшается дымление, которое вызывается обычно дефицитом кислорода в зоне реакции. Недостаток кислорода приводит к усилению крекинга топлива и выделению свободного углерода. Углерод может сгорать по реакции:



для осуществления которой необходимо наличие вблизи крекингующих молекул топлива достаточного количества продуктов сгорания, имеющих в своем составе водяные пары. Очевидно, что в обводненном углеводородном топливе водяных паров всегда достаточное количество, т.е. даже без сгорания  $\text{H}_2$  в  $\text{H}_2\text{O}$  сгорание  $\text{C}$  в  $\text{CO}$  будет обязательным, а затем и  $\text{CO}$  в  $\text{CO}_2$ .

Поскольку температура кипения воды ниже температуры кипения мазута, а слой мазута по отношению к заключенной внутри капли воды выполняет роль теплоизолятора, микрочастицы воды внутри капли перегреваются и мгновенно вскипают с разрывом капли на мельчайшие составляющие. Происходящие микровзрывы капель способствуют увеличению площади поверхности испарения топлива, а следовательно, и теплообмену. Этот эффект способствует интенсификации реакций горения, вследствие чего уменьшается количество сажистых частиц. Уменьшение количества сажистых частиц влечёт за собой уменьшение концентрации бенз(а)пирена, относящегося к канцерогенным полициклическим ароматическим углеводородам, что подтверждается исследованиями [3, 4]

Установлено, что капля эмульсии размером 2 мм и влажностью 30 % сгорает за 2,8 с, а такая же капля необводненного мазута за 3,7 с. Явление внутригорелочного взрыва капель также ускоряет испарение, улучшает смесеобразование и позволяет значительно интенсифицировать процесс сжигания жидких топлив [5].

При сжигании мазута особое внимание уделяется оксидам азота  $\text{NO}_x$ , которые обладают однонаправленным действием с оксидами серы  $\text{SO}_x$  и составляют до 80-90 % токсичности отработавших газов.

Повышенное внимание к оксидам азота  $\text{NO}_x$  обусловлено также тем, что они образуют в организме человека соединения азотной и азотистой кислот, приводят к раздражению слизистой оболочки глаз и дыхательных путей. К тому же в отличие от многих других веществ оксиды азота  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  играют сложную и важную роль в фотохимических процессах, происходящих в тропосфере и стратосфере при солнечном свете, что является причиной образования высоких концентраций озона в атмосфере и появлению так называемого фотохимического смога [6].

Наибольшей популярностью в настоящее время пользуется термическая теория образования оксидов азота, разработанная Я.В. Зельдовичем. Ее основы формулируются следующим образом [7]:

1. Окисление азота происходит за фронтом пламени в зоне продуктов сгорания.

- Выход оксидов азота определяется максимальной температурой горения, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химической природы топлива, участвующего в реакции.
- окисление азота происходит по цепному механизму:



Первая реакция является определяющей, скорость ее зависит от концентрации атомарного кислорода.

- Выход оксидов азота зависит от скорости охлаждения продуктов сгорания.
- В «бедных» смесях (при малой подвижности реакции) выход  $\text{NO}$  определяется максимальной локальной температурой сгорания, т.е. кинетикой ее образования; в «богатых» смесях выход  $\text{NO}$  перестает зависеть от максимальной температуры сгорания и определяется кинетикой разложения, т.е. «закалкой» образовавшихся оксидов азота.
- Концентрация оксидов азота не превышает равновесную при максимальной локальной температуре сгорания.
- Неравномерное распределение температуры в зоне продуктов сгорания (мазо-эффект) заметно влияет на выход  $\text{NO}$  при горении «бедных» смесей и слабо – при горении «богатых» смесей.

Эта теория подтверждает, что темп охлаждения продуктов сгорания влияет не только на конечное содержание оксидов азота в продуктах сгорания, но и на максимальную концентрацию оксидов в зоне их образования. Следовательно, пути управления процессом подавления образования оксидов азота должны быть направлены непосредственно на обнаружение локальных высокотемпературных зон и состоять в эффективном воздействии на них или должны обеспечиваться высокая равномерность смешения компонентов и равномерное распределение температуры газов в факеле, что обеспечивается при сжигании ВМЭ.

Исследования [8] показали, что при сжигании ВМЭ с содержанием 30% воды наблюдается значительное снижение суммарного содержания оксидов азота  $\text{NO}_x$  (до  $166 \text{ мг} / \text{м}^3$ ), а доля  $\text{NO}_2$  возрастает до  $0,33 \text{ мг} / \text{м}^3$ , а содержание сернистого ангидрида  $\text{SO}_2$  снизилось до  $183 \text{ мг} / \text{м}^3$ , т.е. в 2,45 раза по сравнению со сжиганием необводненного топлива, что проиллюстрировано на рис. 1.

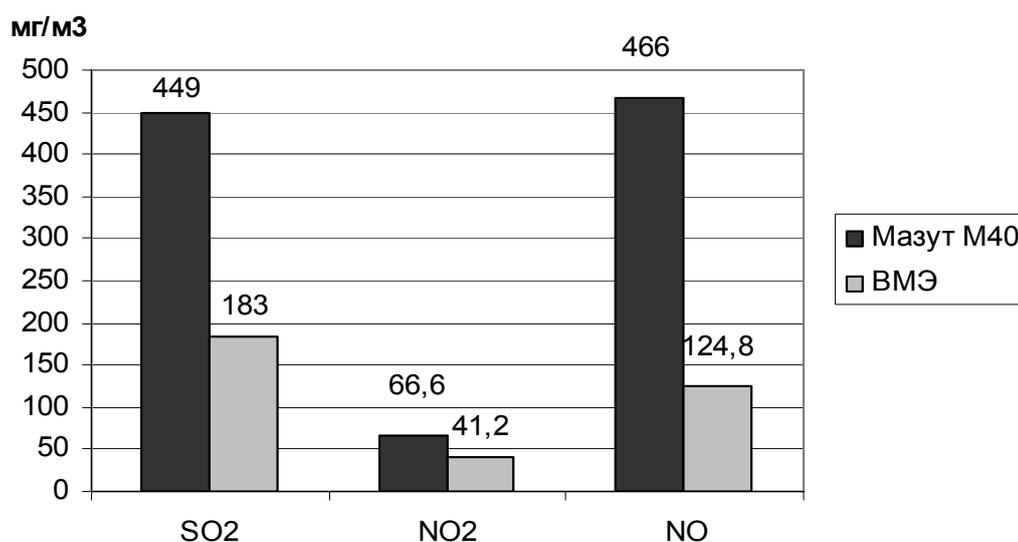


Рисунок 1 – Эмиссия  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$  при сжигании мазута и ВМЭ

Для уменьшения количества выбрасываемого в атмосферу  $NO$  необходимо понижать температуру горения и одновременно стремиться к достижению максимальной скорости охлаждения продуктов сгорания. Вводимая в реакционную зону вода играет не только роль охладителя, но и химического реагента, являющегося источником активных радикалов  $OH$  и  $H$ , существенно влияющих на процесс образования  $NO$  и  $CO$ .

Важным является правильный выбор дозировки вводимой воды. При пониженном количестве вводимой воды эффект нейтрализации получается неполным, а при чрезмерном впрыске концентрации  $NO$  и  $CO$  остаются неизменными, что еще более нежелательно.

Следовательно, наличие водяных паров, их равномерное распределение (и других компонентов) по объему факела вследствие «микровзрывов», равномерное распределение и снижение температуры в зоне горения приводят к уменьшению эмиссии оксидов  $NO_x$  и  $SO_2$ , особенно при переходе на сжигание ВМЭ. Увеличивается доля  $NO_2$  в  $NO_x$  к выходу из топки. Однако по мере увеличения содержания воды в эмульсии при одновременном снижении концентрации  $NO_x$  и  $SO_2$  (рис. 2) увеличивается содержание аэрозоля серной кислоты  $H_2SO_4$ , который улавливается электрофильтрами (например, при производстве серной кислоты нитрозным методом). Необходимо отметить, что появление  $H_2SO_4$  было зафиксировано при содержании воды в эмульсии свыше 10%.

*Выводы:*

1. Содержание воды в виде мелкодисперсных капель в составе ВМЭ интенсифицирует процесс горения, что способствует снижению в выбросах концентрации веществ неполного сгорания.
2. При сжигании ВМЭ существенно снижается эмиссия  $NO_x$  и  $SO_2$  и увеличивается доля  $NO_2$  в оксидах азота

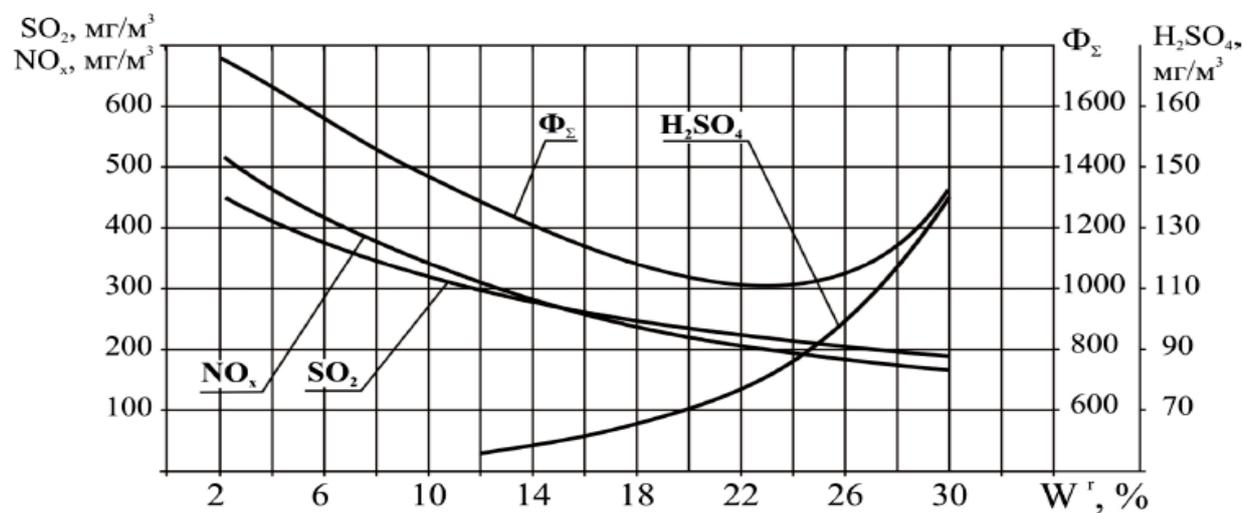


Рисунок 2 – Влияние содержания воды в эмульсии на выбросы  $NO_x$ ,  $SO_2$  и  $H_2SO_4$  и суммарную токсичность  $Φ_Σ$

3. С увеличением содержания воды в эмульсии доля  $NO_x$  и  $SO_2$  уменьшается, а эмиссия аэрозоля серной кислоты, который может быть эффективно уловлен электрофильтрами, увеличивается.
4. Сжигание ВМЭ является наиболее эффективным средством снижения эмиссии  $NO$  и  $SO_2$  благодаря более равномерному распределению по объему факела концентраций компонентов и необходимой скорости снижения температуры в факеле.

**Библиографический список:**

1. Про охорону навколишнього природного середовища: закон України [25.06.1991 р.] // Відомості Верховної Ради (ВВР). – 1991. – № 41. – С. 546.
2. Багрянцев Г.И. Огневое обезвреживание отходов химических производств / Г.И. Багрянцев, В.Г. Леонтьевский, В.Е. Черников // Энергосбережение в химических производствах. – 1986. – С. 69-81.
3. Холл Р.Е. Уменьшение загрязняющих выбросов и повышение КПД промышленных котлов при сжигании водотопливных эмульсий / Р.Е. Холл // Энергетические машины и установки. Серия А. – 1976. – Т. 98, № 4. – С. 1-12.
4. Шевелев К.В. Влияние влажности водотопливных эмульсий на эффективность их сжигания / К.В. Шевелев, В.А. Корягин // Промышленная энергетика. – 1987. – № 6. – С. 38-40.
5. Сумароков М.В. Обезвреживание жидких и твердых не утилизируемых нефтеотходов / М.В. Сумароков, П.В. Молодов, Е.М. Кузнецова // Проблемы энергетики теплотехнологии: 2-й Всесоюз. науч. конф.: тезисы докладов. – [б.м.], 1987. – С. 166.
6. Шульгин В.В. Тепловые аккумуляторы автотранспортных средств / В.В. Шульгин. – СПб.: Политехн.ун-та, 2005. – 268 с.
7. Зубрилов С.П. Охрана окружающей среды при эксплуатации судов / С.П. Зубрилов, Ю.Г. Ищук, В.И. Косовский. – Л.: Судостроение, 2005. – 256 с.
8. Горячкин А.В. Влияние содержания влаги в зоне горения на эмиссию оксидов азота и серы / А.В. Горячкин // Техногенна безпека. – 2006. – № 18. – С. 27-38.

Надійшла до редакції 11.06.09

*C. B. Gridin, M. H. Shaforostova, A. L. Khokhlova*

**АНАЛІЗ ВМІСТУ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН У ПРОДУКТАХ ГОРІННЯ ВОДО-МАЗУТНОЇ ЕМУЛЬСІЇ**

*Розглянутий вплив вологи, що міститься у водо-мазутній емульсії, на емісію оксидів азоту, сірки та інших шкідливих речовин, представлені результати експериментальних досліджень впливу вмісту води у водо-мазутній емульсії на екологічну безпеку теплоенергетичного встаткування.*

***водо-мазутна емульсія, емісія, дисперсність, мікробух***

*S. Gridin, M. Shaforostova, A. Khokhlova*

**THE ANALYSIS OF HARMFUL SUBSTANCES IN COMBUSTION PRODUCTS OF WATER-FUEL EMULSION**

*We have considered the influence of moisture in water-fuel emulsion on the emission of nitrogen oxide, sulfur oxide and other harmful substances. This paper presents the results of the experimental research into the influence of water content in water-fuel emulsion on the environmental safety of heat-and-power equipment.*

***water-fuel emulsion, emission, dispersity, microexplosion***

© *C. B. Gridin, M. H. Shaforostova, A. L. Khokhlova, 2009*