

УДК 620.9:662.6

## ПРОБЛЕМЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ПЕРЕМЕННОГО СОСТАВА

Лебедева Е.А.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»,  
Н. Новгород, e-mail: evgelebedeva@mail.ru

Рассмотрены проблемы использования сбросных газов нефтехимического комплекса в составе топливных смесей. Проанализированы основные технологические процессы нефтепереработки с позиции выделения отходов. Проведено численное исследование характеристик смеси традиционного топлива со сбросными газами в различных соотношениях. Показано, что при расчете теплотехнических характеристик исследуемых смесей по нормативному методу наблюдаются существенные различия в показателях в зависимости от содержания добавляемых отходов. С другой стороны, обобщенные характеристики рассматриваемых топливных смесей, полученные с использованием методики М.Б. Равича, практически не претерпевают изменений. Сопоставлены эксплуатационные характеристики основного топлива и топливных смесей. Отмечено, что высокое содержание водорода в смеси топливного и отдувочного газов обуславливает существенное расширение пределов воспламенения и приводит к росту скорости распространения пламени при сжигании по сравнению с традиционным видом топлива – природным газом. Приведены результаты математического моделирования размеров и формы факела. Выявлены возможные причины нарушений топливного процесса при использовании смесей основного топлива и сбросных газов. Доказана необходимость корректировки методики М.Б. Равича и рассмотрены дополнения к ней в части создания новых расчетных таблиц для обработки результатов теплотехнических испытаний при сжигании топливных смесей. Проанализированы проблемы сжигания смесей основного топлива и сбросных газов нефтехимического комплекса и разработаны рекомендации по устойчивому сжиганию топливных смесей переменного состава. Показана экономическая и экологическая эффективность использования горючих отходов с целью замещения основного органического топлива.

**Ключевые слова:** технология нефтепереработки, отходы, топливные смеси, характеристики, моделирование факела, эффективность сжигания

## PROBLEMS OF BURNING FUEL MIXTURES OF VARIABLE COMPOSITION

Lebedeva E.A.

Federal state budgetary educational institution of higher education «Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering», N. Novgorod, e-mail: evgelebedeva@mail.ru

The problems of the use of waste gases of petrochemical complex in the composition of fuel mixtures are considered. The main technological processes of oil refining from the point of waste disposal are analyzed. A numerical study of the characteristics of the mixture of traditional fuel with waste gases in different ratios. It is shown that when calculating the thermal characteristics of the studied mixtures by the normative method, there are significant differences in the indicators depending on the content of the added waste. On the other hand, the generalized characteristics of the fuel mixtures obtained with the use of the method of M.B. Ravych practically do not change. The operational characteristics of the main fuel and top-shower mixtures are compared. It is noted that the high hydrogen content in the mixture of fuel and blow-off gases causes a significant expansion of the ignition limits and leads to an increase in the rate of flame propagation during combustion compared to the traditional fuel type – natural gas. The results of mathematical modeling of the size and shape of the torch are presented. Identified the possible reasons of violations fuel process using mixtures of primary fuel and discharge accumulated gases. The necessity of correction of the method of Ravych and considered additions to the new calculation tables for the processing of the results of thermal tests in the combustion of fuel mixtures. The problems of combustion of mixtures of the main fuel and waste gases of the petrochemical complex are analyzed and recommendations for sustainable combustion of fuel mixtures of variable composition are developed. Economic and ecological efficiency of use of combustible wastes for the purpose of substitution of the main organic fuel is shown.

**Keywords:** technology of oil refining, waste, fuel mixture, characteristics, modeling of the torch, the combustion efficiency

Одним из направлений «Энергетической стратегии России на период до 2035 г.» является применение новых видов топлива, включая смеси традиционного топлива с отходами технологических процессов. Использование смеси традиционного топлива и производственных отходов, ранее сбрасываемых в атмосферу, позволит существенно сэкономить ресурсы органического топлива и защитить окружающую среду от

загрязнения. С другой стороны, полученная топливная смесь значительно отличается от традиционного топлива, и ее качественное сжигание становится проблемным.

Цель исследования: выявить проблемы и рассмотреть возможность качественного использования сбросных газов нефтехимического комплекса в составе топливной смеси на примере технологий ОАО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез».

**Материалы и методы исследования**

Проанализируем основные технологические процессы нефтехимического комплекса: производство водорода из углеводородного сырья методом парового риформинга и получение высококачественных бензинов и ароматических углеводородов методом каталитического риформинга с позиции выделения горючих отходов [1, 2].

Эндотермические реакции парового риформинга проходят на никелевом катализаторе при высоких температурах. Однако полученный водород содержит примеси: метан, оксид углерода, диоксид углерода и азот. Очистка водорода от примесей осуществляется методом короткоциклового адсорбции (КЦА). Газообразные примеси, выделенные из адсорбента, поступают в атмосферу в виде «отдувочного газа» (далее – отдувочный газ). В качестве примера приведен состав отдувочного газа (табл. 1), сбрасываемого из блока КЦА предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез».

Высококачественные бензины и ароматические углеводороды получают методом каталитического риформинга. При этом углеводородное сырье смешивается с циркулирующим водородсодержащим газом. Далее реакционная смесь нагревается в теплообменнике и печи и поступает в газовый сепаратор высокого давления с выделением водородсодержащего газа (состав, табл. 2). Водородсодержащий газ частично применяется в технологическом процессе, но в основном выводится в атмосферу. При этом его зачастую сжигают в газовых факелах, загрязняя атмосферу и выбрасывая газы с высоким энергетическим потенциалом.

Анализ сбросных газов приведенных выше технологий нефтехимического комплекса (табл. 1 и 2) показывает, что состав отходов зависит от стадии технологических процессов и отличается существенной нестабильностью. Очевидно, что решение проблемы эффективного использования топливных смесей с включением сбросных газов невозможно без проведения дополнительных исследований.

**Таблица 1**

Компонентный состав отдувочного газа блока КЦА

№ п/п	Компонентный состав, %				Теплота сгорания $Q_{1,i}^t$ , МДж/м <sup>3</sup>
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
1	2	3	4	5	6
1	50	1,9	44,2	3,9	7,038
2	45,1	3,1	48,9	2,9	6,306
3	32,22	3,25	59,21	5,32	5,796
4	31,2	2,9	60,8	5,1	5,563

**Таблица 2**

Компонентный состав сбросного водородсодержащего газа

№ п/п	Компонент	Сбросной водородсодержащий газ			
		C1	C2	C3	C4
		2	3	4	5
1	Водород $H_2^d$	92,3	80,0	60,0	40,0
2	Метан $CH_4^d$	2,2	6,0	15,4	20,0
3	Этан $C_2H_6^d$	2,6	4,0	7,5	10,0
4	Пропан $C_3H_8^d$	1,9	3,0	8,2	10,0
5	Бутан $C_4H_{10}^d$	0,8	3,5	6,0	10,0
6	Пентан $C_5H_{12}^d$	0,2	3,5	2,9	10,0

Для достижения цели исследований поставлены следующие задачи: вариантный расчет теплотехнических и эксплуатационных характеристик топливных смесей с различным содержанием технологических отходов; моделирование формы факела при сжигании забалластированной топливной смеси; дополнение методики М.Б. Равича в части создания новых расчетных таблиц для обработки результатов режимно-наладочных испытаний котлов и печей; разработка рекомендаций по устойчивому сжиганию забалластированных топливных смесей; экономическая и экологическая оценка технологии использования сбросных газов в виде добавки к основному топливу.

В качестве основных видов топлива в проведенных исследованиях использовались: традиционное топливо – природный газ и так называемый «топливный» газ – нефтезаводской газ [3], состоящий из смеси углеводородных и водородных фракций.

Сопоставлены различные методики расчета процессов горения и теплотехнических характеристик топлива и продуктов сгорания. Ввиду переменного состава смесей предложено, кроме теплотехнических характеристик, рассчитанных по нормативному методу, использовать обобщенные характеристики топливных смесей, определенные по методике М.Б. Равича [4], в том числе: максимальное теплосодержание 1 м<sup>3</sup> сухих продуктов сгорания; соотношение удельных объемов сухих и влажных продуктов полного сгорания, а также удельных объемов воздуха на горение и сухих продуктов сгорания.

С целью определения устойчивости горения топливных смесей сопоставлены пределы воспламенения и скорость распространения пламени применительно к новому и традиционным видам топлива. Исследования формы факела при сжигании проведены (под руководством автора) путем моделирования процессов горения смеси топливного и отдувочного газов. Выбор топливной смеси обусловлен наличием в отдувочном газе большого количества негорючего компонента – CO<sub>2</sub>, существенно влияющего на форму факела. Построение геометрических характеристик фронта пламени производилось с использованием табулированных функций для смеси с разным соотношением топливного и отдувочного газов [5].

Приведенная длина затопленного осесимметричного факела топливной смеси определялась по формуле

$$\sqrt{\xi_1} = \left\{ 4 \ln \left[ 1 - \left( \sqrt{\beta^2 + 1} - \beta \right)^2 \right] \right\}^{-1/2}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – стехиометрический комплекс.

Стехиометрический комплекс  $\beta$  рассчитывался в зависимости от параметров топливной смеси:

$$\beta = \Omega \frac{c_{a0}}{c_{\infty}} \sqrt{\omega_1} \frac{\omega_{11} + 1}{2\omega_{11}}, \quad (2)$$

где

$$\omega_{11} = \frac{T_\phi}{T_\infty}, \quad \omega_1 = \frac{T_\phi}{T_0}, \quad (3)$$

$\Omega$  – стехиометрический коэффициент;  $c_{a0}$  – концентрация топлива в смеси с балластом;  $c_{\infty}$  – концентрация воздуха в смеси;  $T_0$  – температура топлива, подаваемого в горелку;  $T_\infty$  – температура воздуха на горение;  $T_\phi$  – теоретическая температура горения.

### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты расчета теплотехнических характеристик топливных смесей с различным соотношением природного и водородсодержащего газов, топливного и отдувочного газов в исследуемой смеси привели к следующим выводам. Такие характеристики, как удельные объемы воздуха на горение и удельные объемы продуктов сгорания, рассчитанные по нормативному методу, имеют существенные различия в показателях в зависимости от содержания добавляемых отходов. С другой стороны, обобщенные характеристики рассматриваемых топливных смесей, полученные с использованием методики М.Б. Равича, обладают очень узким диапазоном изменения относительных значений – практически не изменяются применительно к смеси природного и водородсодержащего газов и незначительно изменяются при использовании смеси отдувочного и топливного газов. На рис. 1 сопоставлены традиционные и обобщенные теплотехнические характеристики топливной смеси природного и водородсодержащего газов в зависимости от доли водородсодержащего газа в смеси.

Поэтому, на наш взгляд, применение теплотехнических расчетов по методике М.Б. Равича представляет несомненный интерес, тем более что данная методика широко используется в процессе наладки и эксплуатации котлов и печей, в том числе при определении КПД на основе обобщенных характеристик продуктов сгорания.

Однако в процессе исследований топливной смеси отдувочного и топливного газов, отличающейся существенной забалластированностью негорючими веществами, выявлено, что некоторые обобщенные характеристики продуктов сгорания, такие как

максимальное теплосодержание 1 м<sup>3</sup> сухих продуктов сгорания, Р (кДж/м<sup>3</sup>) и В – отношение удельных объемов сухих и влажных продуктов сгорания, не являются постоянными. С другой стороны, именно эти величины входят в формулы, используемые в действующей методике теплотехнических испытаний топливосжигающего оборудования для определения таких важных показателей эффективности использования топлива, как потери теплоты с уходящими газами ( $q_2$ ) и от химической неполноты сгорания ( $q_3$ ). Следовательно, результат расчета КПД по методике обратного баланса на основе результатов инструментальных замеров становится некорректным, приводит к погрешности.

Разработано дополнение методики М.Б. Равича в части создания новых расчетных таблиц для обработки результатов режимно-наладочных испытаний котлов

и печей, использующих исследуемые виды топливных смесей. Ниже представлен фрагмент одной из разработанных таблиц (табл. 3).

Исследование эксплуатационных характеристик топливных смесей показало, что существенное добавление отходов к природному газу при отсутствии специальных мероприятий неизбежно приведет к неустойчивости процесса горения и возможному срыву пламени по следующей причине. Высокое содержание водорода в отдувочном газе обуславливает существенное расширение пределов воспламенения и приводит к росту скорости распространения пламени. Анализ расчетных данных (рис. 2) свидетельствует о превышении скорости распространения пламени отдувочного газа (состав проб, табл. 1) в 2,5–4,8 раза по сравнению с природным газом.

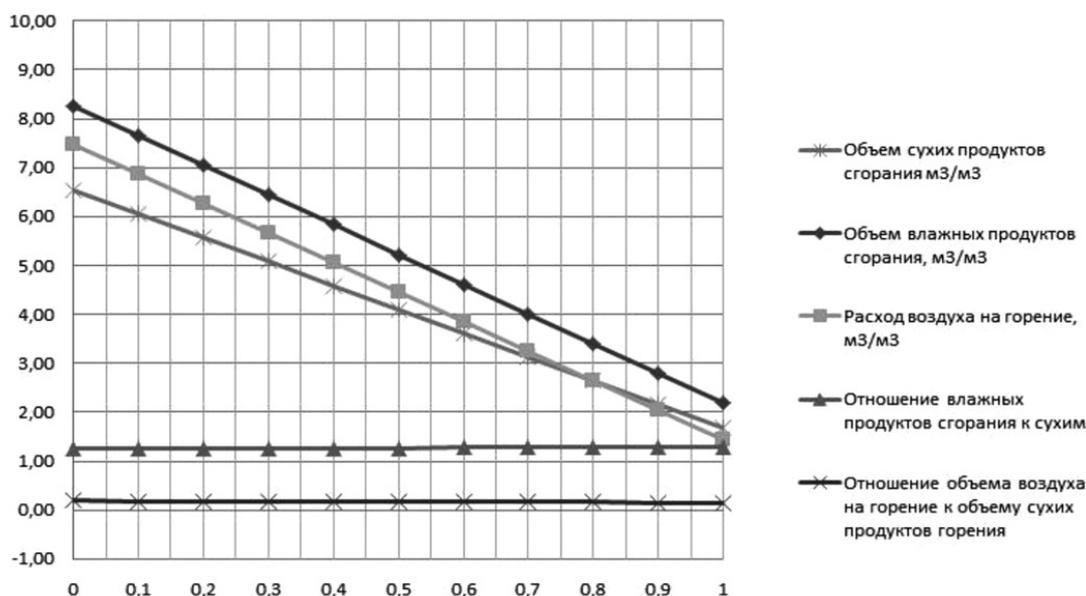


Рис. 1. Зависимость традиционных и обобщенных характеристик исследуемой топливной смеси от доли сбросного водородсодержащего газа в смеси

Таблица 3

Состав и теплотехнические характеристики продуктов полного сгорания смеси топливного и сбросного газов в соотношении 0,7:0,3

Содержание, %				Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания, h	Коэффициент избытка воздуха, α	Калориметрическая температура горения t <sub>кал</sub> , °С
CO <sub>2</sub>	RO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
13,4	13,4	0,0	86,6	1,00	1	1832,6
13,1	13,1	0,5	86,4	1,02	1,02	1807,2
13,0	13,0	0,7	86,3	1,03	1,03	1794,8
12,7	12,7	1,1	86,2	1,05	1,05	1770,5

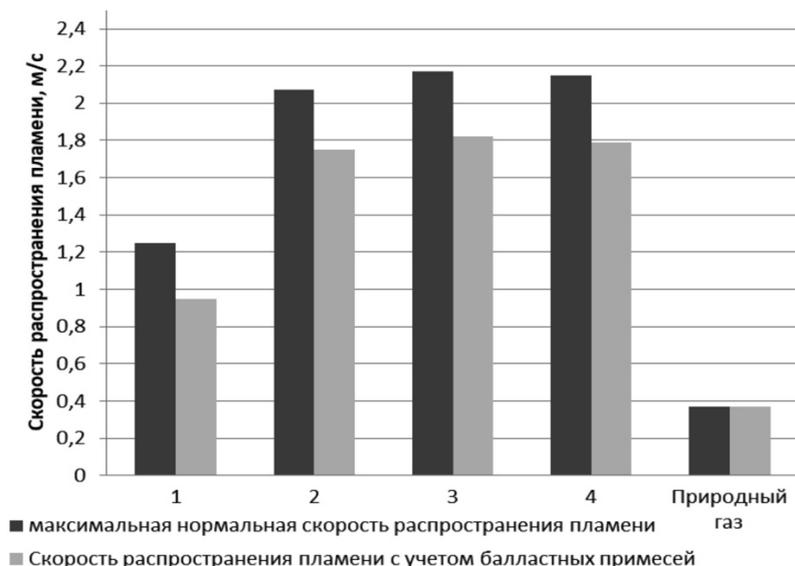


Рис. 2. Скорость распространения пламени

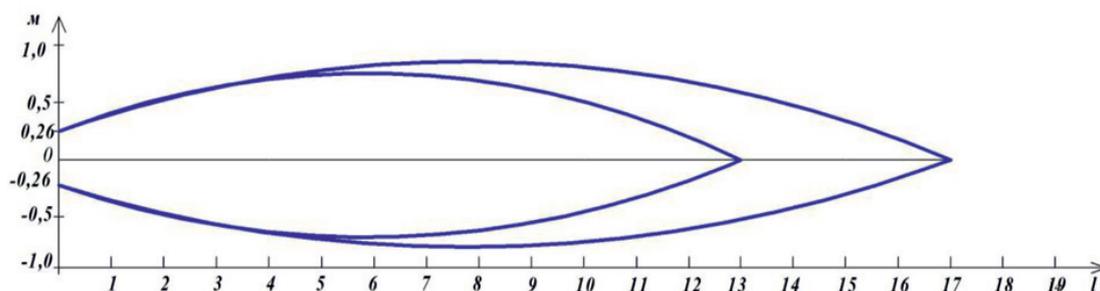


Рис. 3. Сравнительный анализ формы факелов топливного и отдувочного газов

Следовательно, если топочное устройство переводится, например, с природного газа на его смесь с отдувочным, необходимо существенное увеличение скорости подачи топливо-воздушной смеси во избежание проскока пламени в газовую горелку.

Еще более проблемным представляется качественное сжигание забалластированной смеси топливного и отдувочного газов. Анализируя состав различных проб отдувочного газа (табл. 1), следует отметить высокое содержание негорючего углекислого газа –  $\text{CO}_2$ . Наличие балласта приведет к изменению объема факела и безусловно повлияет на его размещение в топочной камере. Для сравнения на рис. 3 представлены форма и размеры факелов топливного и отдувочного газов, полученные путем моделирования процесса их сжигания [5]. Возрастание объема факела отдувочного газа по сравнению с топливным, несомненно,

вызовет химическую неполноту сгорания при сжигании их смеси, вследствие возможного касания факелом поверхностей нагрева топочной камеры.

Таким образом, для решения проблемы эффективного использования топливных смесей переменного состава, содержащих отходы нефтепереработки, необходим комплекс технологических решений по повышению устойчивости горения и обеспечению полноты сгорания.

Для надежного воспламенения топливной смеси и стабилизации пламени предлагается установка специальных огнеупорных насадок на выходе из горелки. Возможны также аэродинамические методы стабилизации факела. Особую роль в обеспечении устойчивого горения и полного дожигания имеют огнеупорные дожигательные устройства, размещаемые в различных частях топочных камер.

Применительно к промышленным печам нефтеперерабатывающей промышленности – это стены радиантной камеры печи, которые становятся «излучающей поверхностью» и обеспечивают дожигание несгоревших компонентов смеси вблизи раскаленных огнеупоров.

Полноты сжигания забалластированных топливных смесей в промышленных котлах можно достигнуть за счет установки специальных дожигательных устройств на выходе из топочной камеры, разработанных кафедрой ТГС ННГАСУ (Е.А. Лебедева). Разработки защищены патентом [№ 2293254], представлены на 58-м Всемирном салоне инноваций, научных исследований и новых технологий «Брюссель-иннова-2009» и награждены золотой медалью.

Проанализированы экономические преимущества применения топливных смесей. Использование горючих газообразных отходов нефтехимического комплекса в качестве топлива или части топлива в топливных смесях позволяет в значительной степени экономить энергоресурсы. Рассмотрим в качестве примера экономию традиционного топлива – природного газа – при сжигании отдувочного газа блока КЦА в печи парового риформинга ОАО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез». В печи сжигается 10000 м<sup>3</sup>/ч отдувочного газа с теплотой сгорания в среднем 12 МДж/м<sup>3</sup>. Количество полученной теплоты с учетом КПД печи составляет 63 638 МДж/ч. Расход природного газа с теплотой сгорания 36,12 МДж/м<sup>3</sup>, необходимый для получения этого количества теплоты, составит 1980 м<sup>3</sup>/ч. Годовая экономия природного газа в связи с использованием отдувочного газа при круглогодичной работе технологической установки составит 17 344,8 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Рассмотрим экологическую эффективность использования топливных смесей. Например, если не утилизировать отдувоч-

ный газ блока КЦА, содержащий от 1,9 до 3,3 % оксида углерода (СО), то выброс в атмосферу только от одной технологии нефтеперерабатывающего предприятия ОАО «ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез» превысит 3500 т оксида углерода в год.

### Заключение

В процессе проведенных исследований выявлены проблемы сжигания топливных смесей, содержащих горючие отходы нефтехимической промышленности, в топках промышленных печей и котлов и предложены технические решения по стабилизации процесса горения и обеспечению полноты сгорания. Установлена экономическая и экологическая целесообразность использования промышленных отходов нефтехимического комплекса при соблюдении предложенных технологических решений.

### Список литературы

1. Полетаева О.Ю., Мухаметзянов И.З., Илолов А., Латыпова Д.Ж., Бородин А.В., Каримов Э.Х., Мовсумзаде Э.М. Основные направления повышения производства топлива из углеводородного сырья // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2015. № 2. С. 3–10.
2. Умашев У.Б., Тюрин А.А., Удалова Е.А. Особенности развития процесса каталитического риформинга в России // Башкирский химический журнал. 2009. Т. 16. № 4. С. 184–186.
3. Верниковская М.В., Снытников П.В., Кириллов В.А., Собянин В.А. Технологические и экономические преимущества переработки попутных нефтяных газов на нефтепромыслах в метано-водородную газовую смесь для питания энергоустановок // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. 2012. № 11. С. 7–12.
4. Равич М.Б. Упрощенная методика теплотехнических расчетов. Теплотехнические расчеты по обобщенным константам продуктов горения. 5-е изд., доп. М.: Наука, 1966. 415 с.
5. Лебедева Е.А., Гордеев Б.А., Зимняков П.С. Численное исследование фронта пламени топливных смесей с использованием отбросных газов нефтехимического комплекса // Приволжский научный журнал. 2015. № 4. С. 75–82.