

УДК 66.011 : 662.76 ; 662.951.2

О. В. ШИХАБУТИНОВА, канд. техн. наук; с.н.с. ИТТФ НАНУ, Киев

СЖИГАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ С ФИТИЛЬНОЙ ГОРЕЛКОЙ В ВИХРЕВОМ РЕЦИРКУЛИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Создан теплогенератор для сжигания тяжелых углеводородов в вихревом рециркулирующем потоке. Выполнены экспериментальные исследования по сжиганию отработанного машинного масла показавшие, что процесс его сжигания можно проводить без нарушений норм на вредные выбросы (NO_x , CO). Выполненные расчеты показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными значениями температуры на выходе из камеры сгорания, приемлемую погрешность (24 %) при прогнозировании выбросов и позволили оптимизировать конструктивные параметры камеры сгорания.

Ключевые слова: теплогенератор, отработанное масло, сжигание в вихревом потоке, камера сгорания, фитильная горелка, вредные выбросы.

Введение

Проблема сжигания тяжелых углеводородов (дизельное топливо, мазут, сырая нефть, смазочные и машинные масла) актуальна в связи с катастрофическими разливами нефти, рекультивацией площадей, на местах дислокации воинских частей, утилизацией использованных смазочных материалов и др. Эти вещества токсичны, имеют невысокую степень биологического распада (10...30 %) и являются опасными отходами, подлежащие обязательному сбору и утилизации. Загрязнение окружающей среды отработанными смазочными материалами активно обсуждается в мировой экологической общественности. Обращение с ними в ЕЭС подлежит отдельной «Директиве по утилизации отработанных масел 75/439/ЕЕС от 16.06.1975». Однако использование углеводородных отходов в качестве горючего для теплоснабжения является одним из перспективных направлений и является экономически оправданным, а с экологической точки зрения допускается законодательством ряда государств. В некоторых странах ЕЭС (Австрия, Бельгия, Финляндия, Франция, Ирландия, Италия, Люксембург, Португалия, Испания, Великобритания) применение отработанных масел в качестве топлива для энергетических целей полностью освобождено от налогов.

Цель исследования, постановка задачи

Тяжелые углеводороды имеют малую скорость испарения, являющуюся определяющим фактором при горении. Воспламенение выделяющихся раньше легких соединений подвергает интенсивному нагреву оставшиеся в жидком состоянии тяжелые соединения. На поверхности частицы жидкого топлива образуется оболочка кокса, содержащая внутри некоторое количество наиболее тяжелых углеводородных соединений. Таким образом, в процессе нагрева капли выделяются не только парообразные вещества, но и образуются твердые частицы кокса, дающие с воздухом гетерогенную смесь. Это может приводить к неполному сгоранию топлива с образованием сажи и/или CO . Подобного недостатка в значительной мере лишены фитильные горелки, пористая структура фитиля которых является фильтром, задерживающим частицы кокса. Это было использовано в разработанной в ИТТФ НАНУ конструкции теплогенератора для сжигания тяжелых углеводородов в вихревом рециркулирующем потоке [1].

Цель работы – экспериментальное и теоретическое исследование теплообмена и горения тяжелых жидких углеводородов в закрученном потоке, разработка и создание

© О.В. Шихабутинова, 2015

камер сгорания для их утилизации путем экологически чистого и эффективного сжигания без нарушения санитарных норм.

Схема созданного теплогенератора представлена на рис. 1 и работает он следующим образом. Жидкое топливо подается в емкость 2. Вентилятор 5 нагнетает воздух в сопла 6 и 7, образуя закрученный воздушный поток с пониженным давлением в центре. Пары жидкого топлива поджигаются свечой зажигания (на рисунке не показано). В камере сгорания образуются факела пламени. Благодаря вихревому движению среды достигается интенсивное перемешивание топлива и окислителя. Горение в условиях избытка топлива в первичной камере сгорания 3 позволяет распределять выделение теплоты между первичной камерой сгорания 3, и камерой дожигания 4 и этим уменьшать максимальную температуру процесса. Это способствует уменьшению выбросов оксидов азота. Близость зоны горения и вихревое движение парогазовой смеси около фитиля 12 обеспечивает интенсификацию процесса испарения топлива с поверхности фитиля в соответствии с расходом окислителя, что дает возможность поддерживать соотношение топливо-окислитель в приемлемых пределах. Закручивание потоков как в первичной камере сгорания 3, так и в камере дожигания 4, создает на оси камер зону пониженного давления и вызывает рециркуляцию горячих газов к корню основного факела. С одной стороны это обеспечивает прогрев топлива перед сжиганием и уменьшение выбросов монооксида углерода (СО), с другой стороны – прогрев пористого материала фитиля увеличивает приток жидкого топлива к поверхности испарения вследствие капиллярных сил. Это явление также способствует саморегулированию процесса горения и, в конечном счете, увеличению диапазона режимов работы [2]. Пространство над центральной зоной фитиля обеднено кислородом. Процесс подачи топлива в эту зону блокируется вставкой 11, исполняющей роль «теплового мостика» к топливу. Зона низких температур на периферии топливной емкости, где подводится непрогретый в достаточной степени воздух, закрыта ограничителем 13. Прежде чем выйти через патрубок 10 в дымовую трубу (на рисунке не показано), продукты сгорания делают два поворота, омывая экраны 8 и 9. Увеличение пути и времени пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур способствует дополнительному перемешиванию и окончанию реакций окисления, что уменьшает выбросы СО. Прежде чем оставить теплогенератор, продукты сгорания проходят вдоль внутренней поверхности корпуса 1, который благодаря развитой за счет ребер (на рисунке не показаны) внешней поверхности интенсивно отдает теплоту в окружающую среду. Это в совокупности повышается КПД теплогенератора.

Результаты исследования

Исследования проводились для отработанного масла бензинового двигателя со следующими физико-химическими свойствами: теплотворная – 37...42 МДж/кг; коэффициент кинематической вязкости при 100 °С – 10,31 сСт; индекс вязкости 117; температура воспламенения – 172 °С; температура застывания – 34 °С; содержание воды – 0,7 %; механические примеси – 0,031 %; цветность более 8 ед. ЦНТ; плотность – 890 кг/м³; щелочное число – 2,85 мг КОН на 1 г масла; пепел сульфатный – 0,81 %; содержание активных элементов Zn – 0,123, Са – 0,25 %.

На рис. 2 показаны изменения температуры в зоне горения при различных вариантах исполнения камеры. В левой нижней части условно показано длину периодов выделения сажи, в прямоугольниках – концентрации СО и NO_x в объемных процентах в соответствующие моменты времени на выходе из теплогенератора [3].

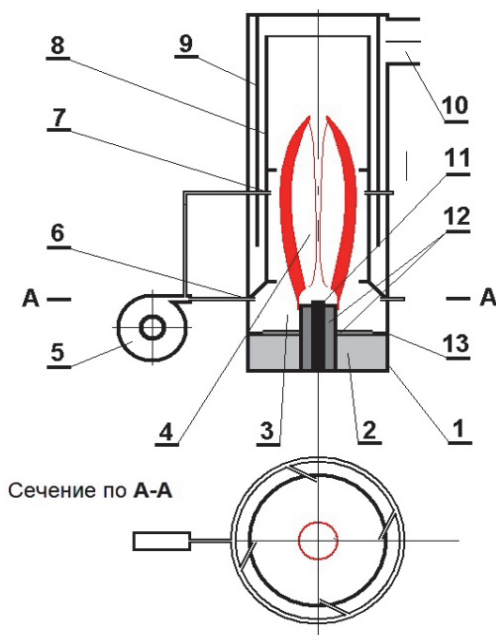


Рис. 1 – Схема теплогенератора:
 1 – корпус; 2 – емкость для жидкого топлива;
 3 – первичная камера сгорания; 4 – камера дожига; 5 – вентилятор; 6 – сопла первичной камеры сгорания; 7 – сопла камеры дожига; 8, 9 – концентрические экраны; 10 – выпускной патрубок; 11 – центральная теплопроводная вставка; 12 – фитиль; 13 – ограничитель

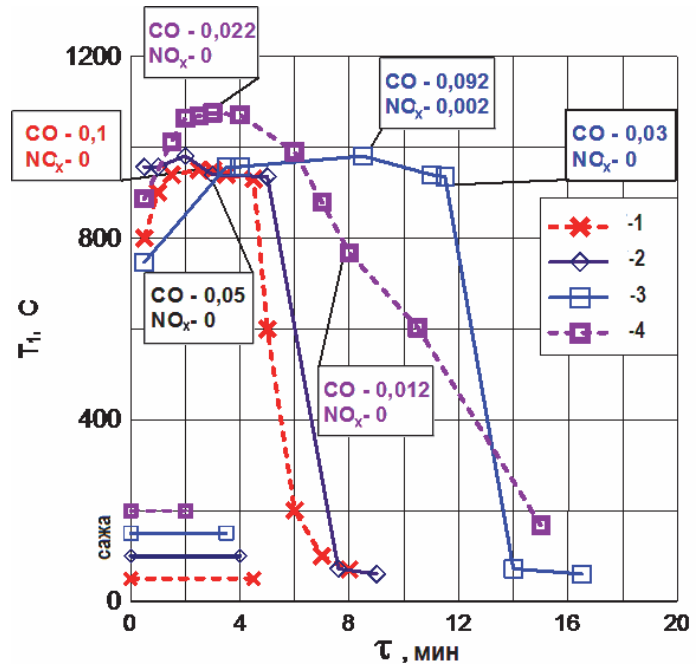


Рис. 2 – Зависимость изменения температуры в зоне горения в камере сгорания от времени: 1 – камера сгорания со свободной поверхностью отработанного масла; 2 – камера сгорания с поверхностью масла частично закрытой цилиндрическим фитилем в центре; 3, 4 – камера сгорания с поверхностью масла полностью закрытой фитилем

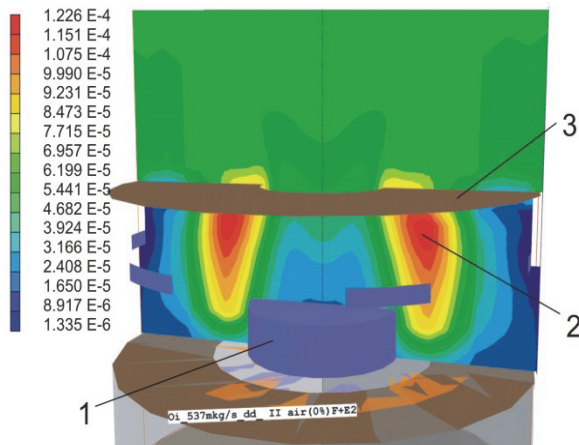


Рис. 3 – Эпюра оксидов азота при сжигании паров масла: 1 – ступенчатый фитиль; 2 – диафрагма; 3 – зона наибольшей концентрации NO_x ($NO_x > 1,2 \cdot 10^{-4}$)

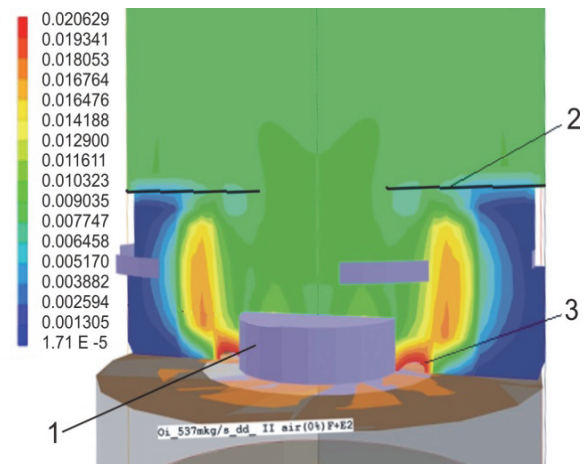


Рис. 4 – Эпюра концентраций CO при сжигании паров масла: 1 – ступенчатый фитиль; 2 – диафрагма; 3 – зона наибольшей концентрации CO ($CO > 0,02$)

Как видно из рис. 2, процесс сжигания в камере сгорания со свободной поверхностью масла характеризуется высокой концентрацией CO и значительным периодом выделения сажи, охватывающим почти все время стационарного горения. После введения в центральную часть емкости цилиндрического фитиля, уменьшился период выделения сажи и снизились выбросы CO. Вариант камеры сгорания с

поверхністю масла полностью закрытой фитилем характеризуется высокими температурами процесса горения тяжелых жидких углеводородов и низкой концентрации CO. Вместе с этим образование сажи наблюдается только в период разогрева зоны горения. Концентрация оксидов азота во всех вариантах почти на грани определения.

Известно, что эффективным способом предотвращения термического разложения тяжелых жидких топлив является частичное окисление углеводородных соединений в начальной стадии их термического преобразования. Экспериментальными исследованиями установлено, что для этого в зоне предварительной газификации необходимо иметь от теоретически необходимого кислорода только 40...50 %. Поэтому при сжигании отработанного машинного масла большое значение имеет перемешивание паров топлива с окислителем для предотвращения термического расщепления углеводородных соединений [4, 5]. Перебор вариантов конструкций теплогенератора и оптимальный их выбор производился на компьютерной модели с помощью лицензированного пакета программ «PHOENICS 3.6». В качестве математической модели процесса использовался стандартный набор балансовых уравнений для описания процессов горения, включающий уравнения Навье-Стокса, переноса компонентов реакций и энергии, полное описание которой приведено в [6].

Основные режимные параметры теплогенератора, для которого составлялась компьютерная модель следующие: минимальная и максимальная тепловая мощность – соответственно 9,2 и 13,3 кВт; минимальный и максимальный расход топлива – 1,23 и 1,8 л/час; расход нагретого воздуха – 200 м³/час; минимальный расход воздуха для горения – 15 м³/час, максимальный – 60 м³/час. Результаты расчета концентраций угарного газа (CO) и оксидов азота в камере сгорания представлены на рис. 3–4.

Как показали расчеты, пространство высоких температур представляет собой тороид, касающийся отверстия в диафрагме первичной камеры сгорания. Этого и следовало ожидать, так как основное истечение из камеры, как и из всякой вихревой, происходит в основном через пограничный слой, располагающийся на торцевой крышке. Здесь в зоне соприкосновения восходящего и нисходящего потоков наблюдается наибольшая турбулентность и происходит интенсивное перемешивание. Из-за преобладания термического механизма образования оксидов азота эпюры температур и концентраций NO_x (рис. 3) подобны. Наибольшие концентрации угарного газа наблюдаются в застойных зонах у основания ступеньки фитиля, куда окислитель поступает в меньшем количестве, чем в основной объем камеры (рис. 4).

Установлено, что повышение температуры горячего воздуха с 350 °С до 420 °С позволяет уменьшить потерю тепла от механического недожога на 0,6 % [2, 5]. Поэтому особое внимание было уделено увеличению подогрева первичного и вторичного воздуха, а так же совершенствованию образования горючей смеси. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

При значении температуры первичного и вторичного воздуха 20 °С, в связи с тем, что соотношение топливо/воздух близкое к стехиометрии, генерация вредных веществ незначительна и составляет для CO – 1,5 10⁻¹⁴ кг/с, а для NO_x – 4,48 10⁻⁶ кг/с. Создается впечатление, что топливо сгорает полностью. Однако, как свидетельствуют расчеты, угроза образования сажи существует, а ее концентрация заметна около охлажденных границ вихря продуктов сгорания, особенно во вторичной камере. Местом существенного образования оксида углерода является края конуса продуктов сгорания, расположенные ближе к входу относительно холодного первичного воздуха.

Влияние подогрева первичного и вторичного воздуха

Первичный воздух, °С	Вторичный воздух, °С	$G_{\text{масла}}$, кг/с 10^4	P , кВт	СО, кг/с	NO _x , кг/с 10^6	$G_{\text{пр-тов}}$, кг/с 10^2	C _x H _y , кг/с
20	20	8,5426	37,57	$1,5 \cdot 10^{-14}$	4,4841	1,4718	–
100	20	10,267	40,62	$3,287 \cdot 10^{-5}$	3,0	1,4896	$5,2 \cdot 10^{-5}$
200	20	12,25	40,58	$4,745 \cdot 10^{-5}$	4,784	1,51	$2,916 \cdot 10^{-4}$
20	100	8,545	37,57	$3,12 \cdot 10^{-15}$	4,846	1,472	–
20	200	8,5467	37,58	$1,21 \cdot 10^{-15}$	5,53	1,467	–

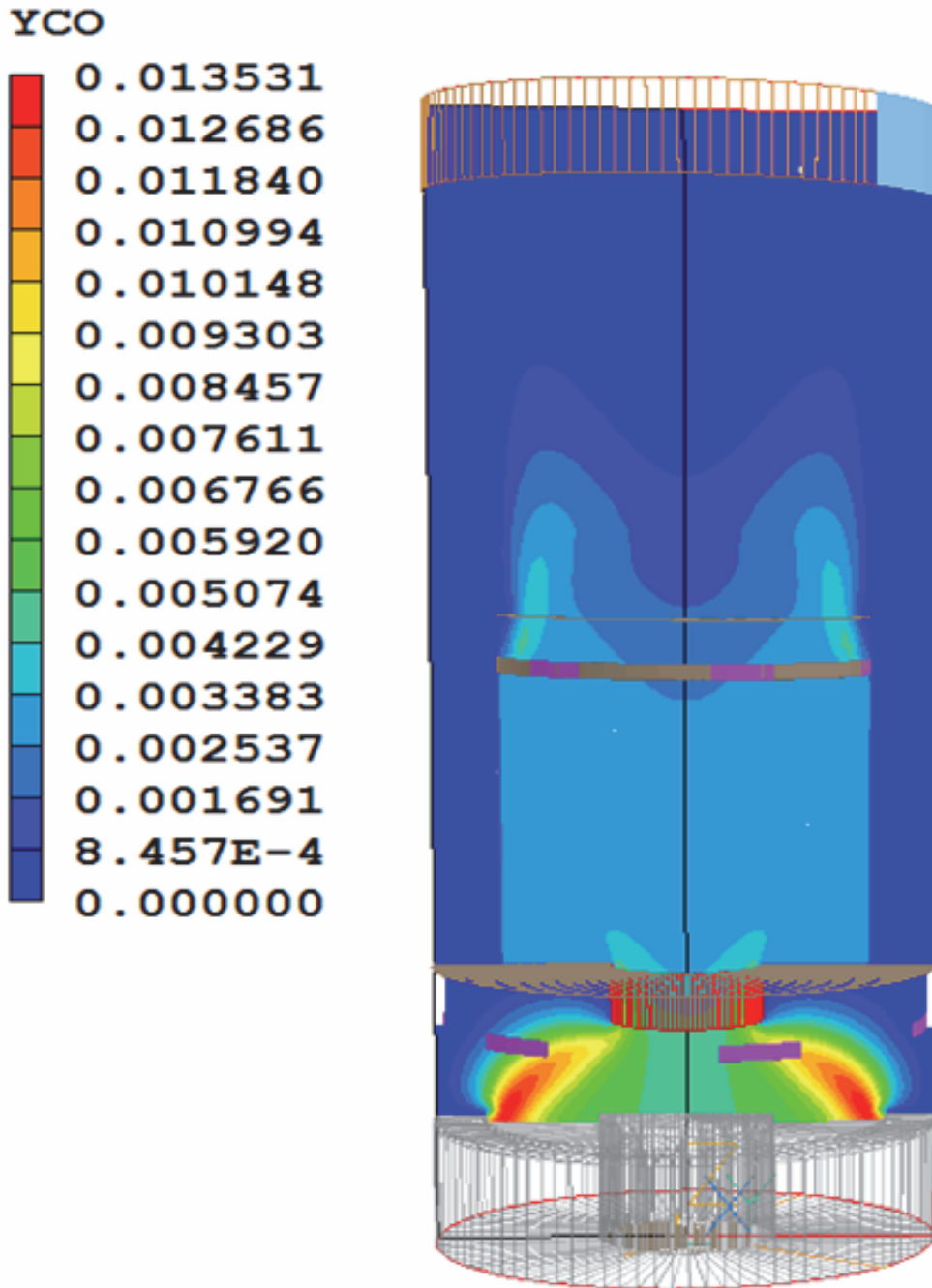


Рис. 5 – Эпюра концентрации монооксида углерода при температурах первичного воздуха 20 °С и вторичного – 200 °С

При повышении температуры первичного воздуха от 20 °С до 200 °С увеличивается расход паров масла и, соответственно, возрастает тепловая мощность установки от 37,6 кВт до 40,6 кВт. Но при этом изменяется процесс сжигания. Если генерация оксидов азота на выходе установки падает в 1,5 раза в результате уменьшения средней температуры в зоне горения, тогда как образование СО увеличивается в тысячи раз, что угрожает превышению санитарных норм. Также растет и образование сажи. Эти недостатки процесса горения можно предотвратить, если разделить образования паров и их сжигания. Пары масла сгорают полностью в пределах первичной камеры. Подогрев вторичного воздуха обеспечивает процесс сжигания масла без нарушения санитарных норм, см. рис. 5.

Сравнение расчета с экспериментом проводилось для заключительного периода стационарного горения. Математическая модель предсказывала концентрацию NO_x в 2...2,5 раза большую, чем измеренная в опыте. Расчетная концентрация СО отличалась от экспериментальной на 28...32 %, расхождения по температуре на выходе из камеры сгорания составляли 21 %.

Причинами расхождений могут быть следующие факторы. Закрученный поток в цилиндрической камере создает в центре зону разрежения, и часть продуктов сгорания возвращается в основу факела. По принципу Ле-Шателье результирующие продукты реакции тормозят ее прохождение. В математической модели предполагалось поступление топлива в поверхностные слои фитиля постоянное и равное среднему расходу. На самом деле вдоль радиуса поверхности испарения существует значительный градиент температуры, увеличивающийся к центру камеры сгорания, а капиллярные процессы в пористых средах зависят от местных градиентов и существенно нестационарны. Расхождения по концентрации оксидов азота можно объяснить наличием реакций восстановления, которые не учитывались.

Экспериментальные исследования так и расчет подтвердили необходимость в центральной части фитиля теплопроводного «мостика» для разогрева жидкого топлива на дне емкости и необходимость отдельного подогрева первичного и вторичного воздуха при условии существования над поверхностью фитиля интенсивного течения. Использование углублений (в том числе и асимметричных) на крышке камеры обуславливает возникновение вихрей, что приводит к качественному перемешиванию паров топлива и окислителя.

Выводы

1) Создан теплогенератор с фитильной горелкой для сжигания тяжелых жидких углеводородов в вихревом рециркулирующем потоке с подогревом воздуха и регулируемым объемом камеры сгорания подвижной крышкой первичной камеры.

2) Экспериментальные исследования по сжиганию отработанного машинного масла показали, что процесс его сжигания можно проводить без нарушений норм на вредные выбросы (NO_x , СО).

3) Расчеты, выполненные с помощью программного комплекса *PHOENICS*, показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными значениями температуры на выходе из камеры сгорания, приемлемую погрешность при прогнозировании выбросов СО и значительное расхождение с экспериментом при определении концентрации оксидов азота.

4) Следует отметить достаточно высокий экономический эффект от применения теплогенераторов на отработанном масле, обусловленный как возможностью использования наиболее выгодного для каждого потребителя вида топлива, так и отсутствием в системе водных магистралей, потерь в них и затрат на их ежегодное

обслуживание и ремонт, так и решение проблемы утилизации отработанных масел и защиту окружающей среды от бесконтрольного загрязнения отработанными маслами. Общий экономический эффект от перевода цехов предприятия с централизованного котельного отопления на использование теплогенераторов достигает более 30 % в год.

Список литературы: 1. Теплогенератор з гнотовим пальником і підігрівачем повітря [Текст] : патент України № 88170 / Халатов А. А., Коваленко Г. В. і др. – u2013 06897 ; заявл. 01.06.2013, Бюл. № 5. – 3 с. 2. *Смульский, И. И.* Аэродинамика и процессы в вихревых камерах [Текст] / И. И. Смульский. – Новосибирск : ВО «Наука», 1992. – 300 с. 3. *Шихабудинова, О. В.* Фитильная горелка с закрученным потоком окислителя для сжигания тяжелых углеводородов [Текст] / О. В. Шихабудинова, А. А. Халатов, О. Е. Хлебников, Г. В. Коваленко // Пром. теплотехника. – 2011. – Т. 33, № 7. – С. 116. – ISSN 0204-3602. 4. *Пчелкин, Ю. М.* Камеры сгорания газотурбинных двигателей [Текст] / Ю. М. Пчелкин. – М. : Машиностроение, 1967. – 207 с. 5. *Частухин, В. И.* Топливо и теория горения [Текст] / В. И. Частухин, В. В. Частухин. – Киев : Вища школа, 1989. – 219 с. 6. *Шихабудинова, О. В.* Компьютерное моделирование сжигания тяжелых жидких углеводородов в фитильной горелке [Текст] / О. В. Шихабудинова, А. А. Халатов, С. Г. Кобзар, Г. В. Коваленко // Труды XIV Минского Международного Форума по тепло- и массообмену. – Том 2, часть 2. – Минск : НАН Беларуси, 2012. – С. 577–581. – ISBN 978-985-6456-82-7.

Bibliography(transliterated): 1. Khalatov, A., et al. " Teplogenerator z gnotovym pal'nykom i pidigrivachem povitrya [Heatgenerator off wick burner and the air preheater]." Ukraine. Patent 88170. u2013 06897. 01 June 2013. Print. 2. Smulsky, I. *Ajerodinamika i processy v vihrevykh kamerah [Aerodynamics and processes in the vortex chamber]*. Novosibirsk : Nauka, 1992. Print. 3. Shihabudinova O., et al. "Fitul'naja gorelka s zakruchennym potokom okislitelja dlja szhiganiya tjazhelyh uglevodorodov [Wick burner with swirling flow of oxidizer for the combustion of heavy hydrocarbons]." *Promyshlennay teplotehnika* 33.7 (2011): 116. ISSN 0204-3602. Print. 4. Pchelkin, Yu. *Kamery sgoraniya gazoturbinnnyh dvigatelej [The combustion chamber of gas turbine engines]*. Moscow : Mashinostroenie, 1967. Print. 5. Chastukhin, V. I., and V. V. Chastukhin. *Topливо i teorija gorenija [Fuel and combustion theory]*. Kiev : Visha shkola, 1989. Print. 6. Shihabudinova, O., et al. "Komp'yuternoe modelirovanie szhiganiya tjazhelyh zhidkih uglevodorodov v fitil'noj gorelke [Computer modeling of the combustion of heavy liquid hydrocarbons in the burner of the wick]." *Proceedings of the XIV Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer 2.2* (2012): 577–581. ISBN 978-985-6456-82-7. Print.

Поступила (received) 03.02.2014