

УДК 62–69

ТЕСТИРОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ОГНЕВОЙ УТИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОТХОДОВ

Долгов Сергей Викторович¹,
sergeydolgov555@rambler.ru

Хаустов Сергей Александрович²,
khaustovSA@tpu.ru

Табакаев Роман Борисович²,
TabakaevRB@tpu.ru

¹ Муниципальное унитарное предприятие г. Нижневартовска «Теплоснабжение»,
Россия, 628616, г. Нижневартовск, ул. Менделеева, 21.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки экологически чистых теплогенерирующих устройств для утилизации жидких техногенных отходов. Этот вид отходов содержит большое количество вредных веществ, наносящих вред окружающей среде даже при хранении на специально оборудованных полигонах. Масштабы проблемы очевидны, поскольку в передовых в данном отношении странах доля перерабатываемых отходов составляет не более 60 %, приводя к тому, что отходы скапливаются в огромном количестве.

Цель работы: оптимизация конструктивной реализации технических решений для огневой утилизации жидких углеводородных отходов.

Методы исследования. С применением программного комплекса «Ansys Multiphysics» произведено математическое моделирование фронта горения при различных условиях истечения, а также подробные измерения профилей давления, скорости реакции, температуры и концентрации компонентов в зоне горения.

Результаты математического моделирования показали, что предложенное техническое решение обладает рядом особенностей: высокое аэродинамическое сопротивление пористого слоя обуславливает преобладание диффузионного горения; тепловая инерция при сжигании топлива в активной зоне затрудняет регулирование мощности, а также требует времени для прогрева устройства и перехода в автотермический режим; равномерное тепловыделение в камере сгорания делает возможным организацию полезного теплосъема с использованием тепловоспринимающей поверхности («рубашки охлаждения»); низкие температуры в реакторе являются фактором снижения выбросов оксидов азота и других вредных веществ при огневой утилизации жидких углеводородных отходов. При этом благодаря низкой теплопроводности частиц засыпки, формирующих активную зону с тепловой инерцией, происходит интенсивный теплообмен пористой среды с топливовоздушной смесью. Таким образом, выравнивается объемное распределение температуры, а реакционная зона заполняет большую часть камеры сгорания. Однако преобладание диффузионного горения требует больших избытков воздуха и длинных траекторий спутных течений топлива и окислителя для исключения недожога.

Ключевые слова:

Жидкие углеводородные отходы, огневая утилизация, пористый слой, криптол, теплогенерирующее устройство на жидком топливе.

Введение

Проблема утилизации жидких техногенных отходов является одной из приоритетных задач, решаемых мировым сообществом. Главными источниками подобных отходов являются нефтеперерабатывающие предприятия, химическая промышленность и автомобильный транспорт. В зависимости от вида и назначения отходов в их составе может содержаться более 200 опасных соединений [1], способных нанести непоправимый вред человеку и окружающей среде.

По оценке экспертов [2], в одних только нефтяных амбарах различных нефтеперерабатывающих предприятий РФ уже накоплены сотни миллионов тонн нефтешламов, в дополнение к этому ежегодно образуется от 2 до 7,7 млн тонн отработанных смазочных материалов [3, 4]. При этом на переработку

направляется примерно 15 % от всего количества образующихся отходов [1, 3].

В странах ЕС, уделяющих особенно пристальное внимание экологии и ресурсоэффективности производства, более 25 % образующихся отходов подвергаются вторичной переработке. В ряде стран введено правило, согласно которому невозможно приобретение новых смазочных материалов без отправки на утилизацию отработанных. В таких странах норма сбора отработки достигает 60 % от потребленного количества смазочных материалов [4].

Среди возможных путей утилизации можно выделить четыре основных направления: захоронение, регенерация, огневое обезвреживание и переработка для получения нового продукта [5–7]. На территории РФ утилизация углеводородных отхо-

дов в основном ограничивается сбором и вывозом с целью последующего захоронения в специальных могильниках [8, 9]. Такой способ утилизации негативно сказывается на экологическом состоянии почв и биосферы в целом, изымает внушительные территории из хозяйственной деятельности.

В зарубежных странах часто прибегают к регенерированию отработанных смазочных материалов [10–14]. Однако этот способ в настоящее время не оправдал возложенных ожиданий. Даже при использовании комплексной регенерации восстановленное масло уже не имеет первоначальных эксплуатационных свойств и характеризуется повышенным содержанием нежелательных примесей. Кроме того, в процессе регенерации также образуются токсичные отходы, нуждающиеся в утилизации. Постоянно повышающиеся требования к качеству и характеристикам моторных масел обязывают производителя использовать большое количество дорогостоящих присадок, увеличивающих её конкурентоспособность. В результате этот способ утилизации по большей части является экономически нецелесообразным, требующим постоянных государственных дотаций.

По мнению авторов, к наиболее перспективным направлениям можно отнести огневое обезвреживание и переработку в новый вид продукта. Причем огневая утилизация позволит одновременно решить проблему энергообеспечения отдаленных от основных транспортных магистралей и труднодоступных районов. На данный момент энергоснабжение этих районов обеспечивается за счет привозного дизельного топлива, стоимость которого из-за транспортных расходов возрастает в разы [15].

В связи с вышеперечисленным разработка технических решений по огневой утилизации жидких углеводородных отходов и использованию полученной энергии для нужд малой энергетики является актуальной задачей научных исследований.

Огневая утилизация жидких углеводородных отходов в пористой среде

При осуществлении огневого способа утилизации жидких отходов главными проблемами являются обеспечение взрывопожаробезопасности и экологичности сжигания [16]. В качестве одного из возможных вариантов, позволяющих решить перечисленные проблемы, рассмотрена огневая утилизация жидких углеводородных отходов в пористом слое. В этом случае удастся обеспечить инфракрасное горение в беспламенном режиме, снижение металлоемкости камеры сгорания и значение температуры в зоне сжигания ниже порога образования термических оксидов азота [17, 18].

Ранее при участии авторов были разработаны конструктивные модификации горелочных устройств беспламенного типа для огневой утилизации жидких топлив [19–22], в качестве которых использованы керосин марки ТС-1 и смесь отходов

легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ). Физические исследования разработанных опорных моделей выполнялись на экспериментальных стендах, конструкции, принцип действия и методика испытаний которых описаны ранее [19, 20].

Обзор исследований, произведенных на математических моделях [22], и анализ результатов натурных испытаний [19–21] позволяют заключить, что во всех изученных горелочных устройствах из-за низкой скорости смесеобразования в пористом слое процесс полного окисления топлива требует высокого избытка воздуха ($\alpha=2-6$). Снижение коэффициента избытка воздуха относительно этих значений приводит к превышению нормативных уровней по недожогу топлива, горение при этом выходит за пределы реакционной зоны, то есть в «неэкологичном» факельном режиме, использующем диффузию атмосферного кислорода в качестве окислителя [21]. Организация сжигания в условиях высоких значений объемов воздуха и аэродинамического сопротивления рабочей области требует дополнительных энергозатрат на дутьё, а следовательно, обладает ограничениями по мощности при огневой утилизации низкокалорийных жидких углеводородных отходов.

Целью работы определено тестирование посредством численного моделирования конструктивного исполнения и компоновки элементов горелочных устройств, направленное на интенсификацию смесеобразования в пористом слое при избытках воздуха, близких к стехиометрическим. Задачей настоящего исследования определено: изучение особенностей и закономерностей протекания процесса горения в пористом слое для использования при разработке конструктивной схемы горелочного устройства, предназначенного для эффективной огневой утилизации жидких отходов.

Объект и метод исследования

С применением программного комплекса Ansys Multiphysics произведено математическое моделирование фронта горения при различных условиях истечения и получены детальные профили полного и статического давления, температуры и концентрации компонентов в зоне горения. Исходными данными для математического моделирования являлись геометрические и режимные параметры выбранной модели горелочного устройства [19]. По результатам исследования предложена модернизированная система огневой утилизации жидких углеводородных отходов в виде теплогенерирующей установки (рис. 1), в которой:

- камера сгорания (2) выполнена в виде полого цилиндра, что исключает утечку топливовоздушной смеси через стены камеры;
- воздушный инжектор (5) выполнен с перфорациями вдоль всей длины, что обеспечивает равномерную подачу воздуха в камеру сгорания по направлениям: снизу вверх и из центра – к периферии (топливным инжекторам);

- топливные инжекторы (4) равномерно расположены вокруг воздушного инжектора, что позволяет обеспечить равномерное перемешивание окислителя (воздуха) и топлива.

В основе рассмотренного технического решения лежит камера сгорания (2), выполненная в виде газоплотного, полого, заполненного химически инертным пористым наполнителем цилиндра диаметром 57 мм и высотой 200 мм. Фронт горения в такой камере стабилизируется с помощью участка пористой засыпки (6), установленного на пути топливоздушного потока и предварительно разогретого до температуры воспламенения топлива, что является важным начальным условием для математического моделирования. В ходе вариативного исследования с разными значениями этого параметра установлено, что при начальной температуре пористого слоя ниже температуры воспламенения топлива сходимость решения уравнений установившегося режима горения и теплообмена не достигается. На основании этого можно заключить, что из-за тепловой инерции пористого наполнителя автотермическое горение в изучаемом горелочном устройстве возможно только в случае предварительного прогрева пористой среды выше температуры воспламенения топлива. Именно раскаленная фракция наполнителя является источником зажигания.

Результаты исследования

Контурные графики скорости химической реакции и массовой доли окислителя (рис. 2) позво-

ляют оценить геометрические размеры реакционной зоны, выделить области кинетического и диффузионного горения. Жидкое топливо, двигаясь в слое разогретого пористого наполнителя, разогревается и испаряется. На наружных границах топливной струи происходит её диффузия в воздушный поток. Образованная топливоздушная смесь воспламеняется, формируя узкий фронт кинетического горения, в котором выгорает не более 50 % топлива. Так, вблизи перфораций топливных инжекторов наблюдаются наибольшие значения скорости химической реакции – 200 моль/(м³·с). Дальнейшее горение происходит в диффузионном режиме по мере смесеобразования, в результате чего фронт горения занимает треть объема пористой засыпки (рис. 2, а). Средняя расчетная скорость реакции в этой области 90 моль/(м³·с).

Полученные данные о скорости реакции имеют практическую значимость для расчета интегральных характеристик огневой утилизации жидких углеводородных отходов. Однако непосредственный расчет таких параметров, как тепловыделение и расход топлива, на основе этих данных требует знания молярной массы эквивалентов сложных горючих веществ (г/моль). Кроме того, молярные массы эквивалентов простых веществ в составе жидких углеводородных отходов зависят от стехиометрии соответствующих брутто-реакций горения, что в отсутствие справочной информации также усложняет применение полученных данных на практике. В то же время для решения ряда инженерных задач существует упрощенный способ кос-

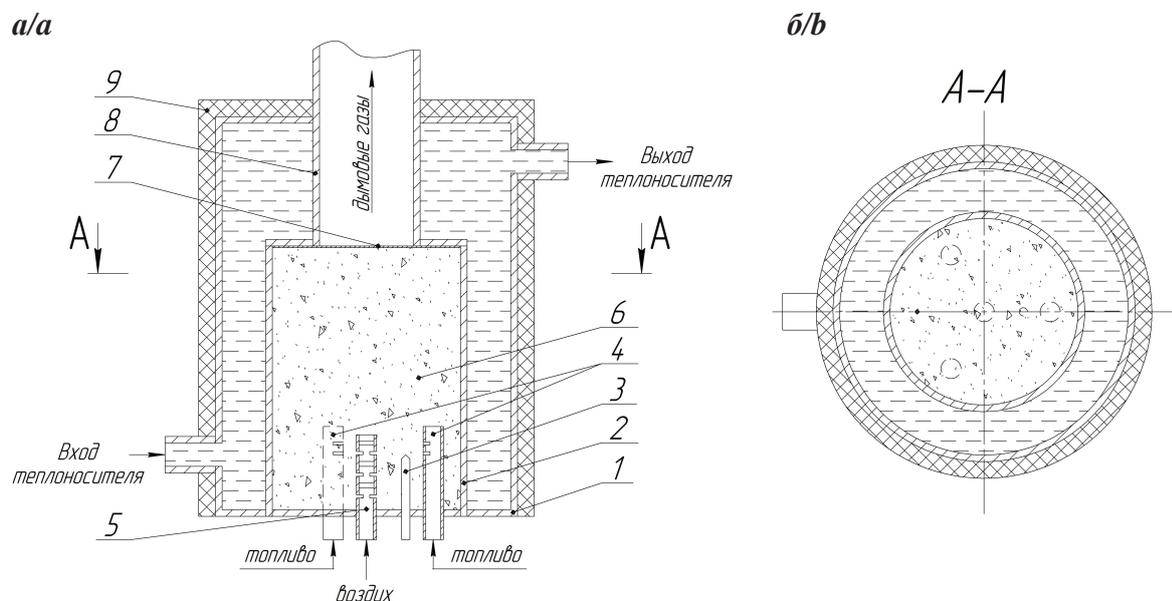


Рис. 1. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы теплогенерирующей установки на жидких углеводородных отходах: 1 – корпус; 2 – камера сгорания; 3 – запальный элемент; 4 – топливные инжекторы; 5 – воздушный инжектор; 6 – пористый наполнитель (криптол); 7 – стальная сетчатая насадка; 8 – канал продуктов сгорания; 9 – тепловая изоляция

Fig. 1. Longitudinal (a) and transverse (b) sections of a heat generating unit utilizing liquid hydrocarbon wastes: 1 is the casing; 2 is the combustion chamber; 3 is the ignition element; 4 are the fuel injectors; 5 is the air injector; 6 is the porous filler (carbon beads); 7 is the steel mesh nozzle; 8 is the channel for combustion products; 9 is the thermal insulation

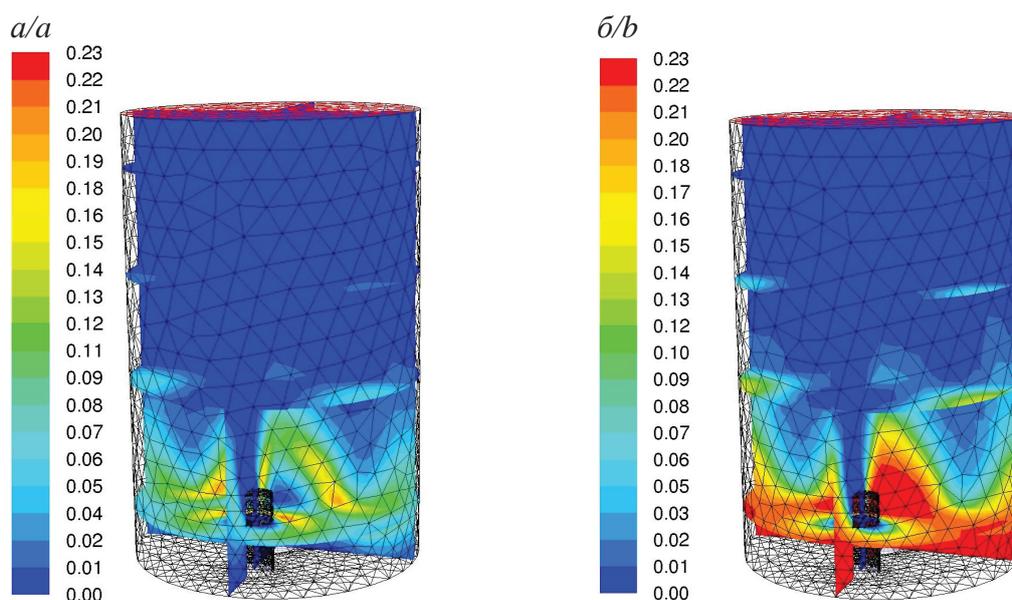


Рис. 2. Распределение скорости химической реакции, кмоль/(м³·с), (а) и массовой доли кислорода, кг/кг, (б) в продольном сечении камеры сгорания

Fig. 2. Reaction rate contours, kgmol/(m³·s) (a) and the oxygen mass fraction, kg/kg (b) in a longitudinal section of the combustion chamber

венного расчета на основе молярной массы окислителя O₂, которая известна (равна 0,032 кг/моль). Исходя из средней расчетной скорости реакции (90 моль/(м³·с)), кислород в одном кубометре пористого наполнителя выгорает со скоростью 2,88 кг/с (90·0,032), что соответствует полученным результатам моделирования (рис. 2, б). Таким образом, зная массовую долю кислорода в воздухе и теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, можно рассчитать нужные интегральные характеристики огневой утилизации для любого горючего соединения.

Например, для керосина марки ТС-1, использованного в работе [21], необходимое количество воздуха, согласно рекомендациям [23], составляет 14,8 кг/кг. Расход этого топлива при сжигании в 1 м³ пористой засыпки составит 2,88/(0,23·14,8)=0,85 кг/с, что при теплоте сгорания 44,8 мДж/кг [21] и коэффициенте полезного действия теплогенераторов малой мощности 92–95 % [24–26] позволяет получить около 35,1 МВт тепловой мощности. Мощность описанной установки, где реакционная зона занимает объем 1,7·10⁻⁴ м³, при работе на керосине марки ТС-1 составит 6,0 кВт.

Несмотря на то, что зона реакции локализована в нижней части камеры сгорания, благодаря прогреву дымовыми газами и теплопроводности в пористом слое распределение температур по объему камеры сгорания имеет близкий к равномерному характер (рис. 3). Следует отметить, что в стационарном режиме значения температуры гранул наполнителя уравниваются с температурой омывающего их потока дымовых газов.

Максимальное значение температуры в зоне горения (1357 К) не превышает 1473 К – порога образования «воздушных» окислов азота NO_x [27]. В связи с этим можно утверждать, что сжигание жидких углеводородных отходов в данном устройстве будет сопровождаться низкими выбросами этих вредных веществ в окружающую среду. По мере отдаления от центра температура в пористом слое уменьшается и в пристеночной области её значения варьируются в диапазоне 1036–1220 К. По закону смещения Вина, расчетный максимум спектра излучения при указанных температурах лежит в инфракрасном диапазоне волн с длиной 2377–2799 нм. Спектр, излучаемый гранулами наполнителя, в видимом диапазоне (рис. 4) смоделирован с применением таблицы цветности чернотельного излучения. Мощность излучения, рассчитанная по закону Стефана–Больцмана, при средней температуре квадратного метра поверхности 1127 К, составляет 91,8 кВт/м². Таким образом, общая площадь изучаемой поверхности камеры сгорания (0,04 м²) излучает 3,7 кВт, или 61,7 % от общей тепловой мощности устройства. Долю конвективного тепла, уносимого дымовыми газами (оставшиеся 38,3 %), можно сократить, увеличив толщину пористого слоя, что, в свою очередь, увеличит инерционность (время прогрева) и затруднит регулирование мощности устройства. Поэтому для снижения тепловых потерь с уходящими газами предусмотрено водяное охлаждение канала продуктов сгорания (рис. 1, поз. 8) за камерой сгорания (поз. 1).

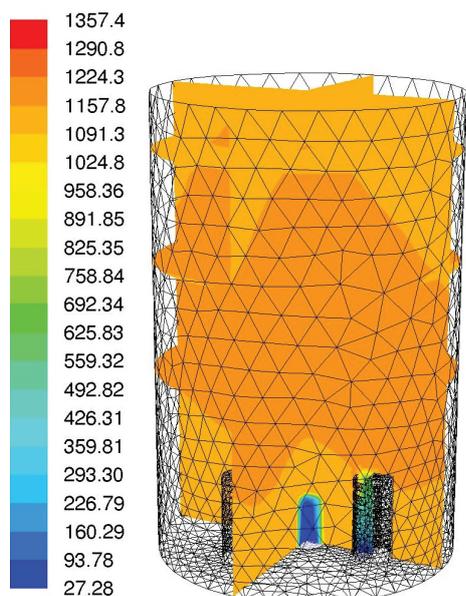


Рис. 3. Распределение температуры (K) в продольном сечении камеры сгорания

Fig. 3. Temperature contours (K) in the longitudinal section of the combustion chamber

Заключение

Результаты математического моделирования предлагаемого к применению устройства огневой утилизации жидких углеводородных отходов показали, что оно обладает рядом особенностей:

- высокое аэродинамическое сопротивление пористого слоя обуславливает преобладание диффузионного горения;
- тепловая инерция наполнителя затрудняет регулирование мощности, а также требует времени для прогрева устройства и перехода в авторемический режим;
- равномерное тепловыделение в камере сгорания делает возможным организацию полезного

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Д.А., Селявский В.Ю. Потенциал использования углеводородокисляющих микроорганизмов для утилизации отработанных масел, а также жидких органических радиоактивных отходов // Перспективы развития фундаментальных наук: сб. науч. трудов XI Междунар. конф. студ. и молодых ученых. – Томск: ТПУ, 2014. – С. 520–523.
2. Моделирование полупромышленной установки по утилизации жидких нефтяных отходов термомеханическим методом / А.Г. Сафиулина, И.Ш. Хуснутдинов, А.З. Бакирова, Р.Р. Забаров, С.И. Хуснутдинов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – № 10. – С. 269–270.
3. Дьяков М.С., Солдатенко Н.А., Глушанкова И.С. Обоснование выбора ресурсосберегающих технологий утилизации отработанных масел // Экология и промышленность России. – 2011. – № 5. – С. 16–19.
4. Чередищенко Р.О., Станьковский Л., Дорогочинская В.А. Современное состояние переработки отработанных смазочных материалов в РФ // Труды Российского государственного уни-

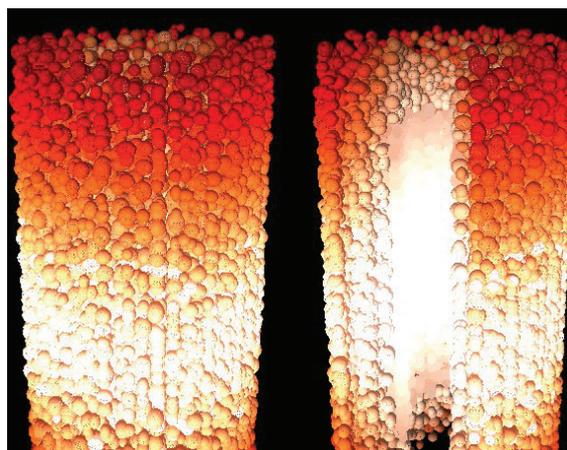


Рис. 4. Геометрическая модель пористого наполнения, окрашенная по таблице цветности чернотельного излучения

Fig. 4. Geometrical model of porous filler, colored according to the blackbody radiation color-diagram

теплосъема с использованием рубашки охлаждения;

- низкие температуры в реакторе являются фактором снижения выбросов оксидов азота и ряда других вредных веществ при огневой утилизации жидких углеводородных отходов.

Установлено, что благодаря теплопроводности в пористой среде и тепловой инерции наполнителя происходит интенсивный теплообмен пористой среды с топливоздушной смесью, выравнивается объемное распределение температуры, а реакционная зона заполняет большую часть камеры сгорания. Однако преобладание диффузионного горения требует большого избытка воздуха и длинных траекторий спутных течений топлива и окислителя для исключения недожога.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16–38–50126 (мол_нр).

верситета нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2010. – № 2. – С. 81–85.

5. Андрушкин А.Ю. Утилизация жидких углеводородных отходов // Экология промышленного производства. – 2012. – № 2. – С. 26–29.
6. Григоров А.Б. Комплексная переработка отработанных моторных масел // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – Т. 99. – № 5. – С. 40–44.
7. Barişçi S., Öncel M.S. The disposal of combed cotton wastes by pyrolysis // International Journal of Green Energy. – 2014. – V. 11. – P. 255–266.
8. Севастьянов О.М., Захарова Е.Е. Подземное захоронение жидких производственных отходов нефтегазовой отрасли России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2011. – Т. 6. – № 1. – С. 1–21.
9. Грабовников В.А., Боревский Б.В. Подземное захоронение жидких отходов – успехи, проблемы, перспективы // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 6. – С. 512–523.

10. A novel one-step flocculation method for recycling wasterolling oil / C. Liu, L. Cao, P. Ma, J. Wang, S. Rong, S. Han // *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization and Environmental Effects.* – 2016. – V. 38. – P. 2043–2049.
11. Research progresses of catalytic regeneration of waste oils / K. Xiong, L. Zhou, X.-M. Zhang, G.-M. Jiang, X.-S. Lv // *Modern Chemical Industry.* – 2016. – V. 36. – P. 53–57.
12. Yang Y., Li H., Gao W. Regeneration of waste lubricating-oil by extraction-flocculation // *Petroleum Processing and Petrochemicals.* – 2015. – V. 46. – P. 84–88.
13. Bogatu L., Onutu I., Cursaru D. New alternative for conditioned oils revaluation // *Journal of the Balkan Tribological Association.* – 2015. – V. 21. – P. 222–232.
14. Len'kova A.V., Dolotovskii I.V. A plant for absorbent regeneration utilizing fuel wastes // *Chemical and Petroleum Engineering.* – 2013. – V. 49. – P. 517–521.
15. Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // *Нефтегазовая вертикаль.* – 2005. – № 17. – С. 63–65.
16. Fluidized bed combustion of pesticide-manufacture liquid wastes / Z. Arsenijević, Z. Grbavčić, B. Grbić, N. Radić, R. Garić-Grulović, S. Miletić, G. Savčić, B. Dordević // *Journal of the Serbian Chemical Society.* – 2010. – V. 75. – P. 523–535.
17. Al-attab K.A., Ho J.C., Zainal Z.A. Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas // *Experimental Thermal and Fluid Science.* – 2015. – V. 62. – P. 1–8.
18. Experimental investigation into the combustion characteristics of propane hydrates in porous media / X.-R. Chen, X.-S. Li, Z.-Y. Chen, Y. Zhang, K.-F. Yan, Q.-N. Lv // *Energies.* – 2015. – V. 8. – P. 1242–1255.
19. Испытания горелочного устройства беспламенного горения и инфракрасного излучения / С.В. Долгов, А.С. Заворин, А.Ю. Долгих, А.Н. Субботин // *Известия Томского политехнического университета.* – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 39–42.
20. Аэродинамические испытания горелочного устройства / А.С. Заворин, А.Ю. Долгих, Р.Н. Фисенко, С.В. Долгов // *Известия Томского политехнического университета.* – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 33–37.
21. Долгов С.В., Ключко К.И., Табакаев Р.Б. Испытания горелочного устройства // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева.* – 2014. – № 2. – С. 38–41.
22. Disposal of liquid combustible wastes using flameless burners with porous carbon matrix / S. Dolgov, E. Savchenko, S. Khaustov, R. Tabakaev, A. Zavorin // *EPJ Web of Conferences.* – 2016. – V. 110. – P. 1–5 (01074).
23. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: Энергия, 1998. – 256 с.
24. Васильев А.В., Антропов Г.В., Сизоненко А.А. Сравнительный анализ паровых и водогрейных котлов для промышленных и отопительных котельных // *Промышленная энергетика.* – 2003. – № 9. – С. 18–23.
25. Верес А.А., Носова Т.В., Малов А.В. Перспективы применения блочных котельных с использованием в качестве источника теплоснабжения водогрейных жаротрубных котлов Турботерм-Гарант // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2010. – № 4. – С. 27–28.
26. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers / D. Patiño, B. Crespo, J. Porteiro, J.L. Míguez // *Applied Thermal Engineering.* – 2016. – V. 100. – P. 849–860.
27. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

Поступила 13.09.2016 г.

Информация об авторах

Долгов С.В., инженер 1 категории по испытаниям и наладке Муниципального унитарного предприятия «Теплоснабжение».

Хаустов С.А., ассистент кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Табакаев Р.Б., кандидат технических наук, инженер кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62-69

TESTING THE DESIGN OF TECHNICAL SOLUTIONS FOR LIQUID HYDROCARBON WASTES FIRE SALVAGING

Sergey V. Dolgov¹,
sergeydolgov555@rambler.ru

Sergey A. Khaustov²,
khaustovSA@tpu.ru

Roman B. Tabakaev²,
TabakaevRB@tpu.ru

¹ MUE «Teplosnabzhenie»,
21, Mendeleev street, Nizhnevartovsk, 628616, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is caused by the need to develop the environmentally friendly heat-generating devices for salvaging liquid technological wastes. This type of wastes contains large amounts of pollutants, harming to environment even when stored in specially engineered landfills. The magnitude of the problem is obvious, because in the most environmentally-advanced countries the proportion of the recycled wastes does not exceed 60 %, resulting in accumulation of wastes in large amounts.

The main aim of the research is to optimize the constructive implementation of technical solutions for salvaging liquid hydrocarbon wastes.

The methods used in the research. Using the software package «Ansys Multiphysics» the authors have simulated the combustion front at various flow conditions and measured thoroughly pressure profiles, reaction rate, temperature and components concentrations in the combustion zone.

The results of the investigation shown that the proposed technical solution has a number of features. The high aerodynamic resistance of the porous filler causes a prevalence of the diffusion combustion. The thermal inertia of the burning core makes power control difficult and takes time for warming up the device and entering the autothermal mode. The uniform heat dissipation in the combustion chamber enables a useful heat removal using the heating surface (water jacket). The low temperatures in the reactor are the reduction factor for the emissions of nitrogen oxides and other harmful substances during the utilization of liquid hydrocarbon wastes. A low thermal conductivity of the filler particles forming the thermally inertial core causes the intensive heat exchange of a fuel-air mixture with the porous medium. Thus, the temperature distribution becomes uniform in volume, and the reaction zone fills a large part of the combustion chamber. However, the prevalence of the diffusive combustion requires a large air excess and long cocurrent trajectories of fuel and oxidant flows in order to eliminate the unburned carbon.

Key words:

Liquid hydrocarbon wastes, fire salvaging, porous filler, carbon beads, heat-generating unit using liquid fuel.

The research was financially supported by the RFBR, science project no. 16-38-50126 (mol_nr).

REFERENCES

1. Filatov D.A., Selyavsky V.Yu. Potentsial ispolzovaniya uglevododorodokislyayushchikh mikroorganizmov dlya utilizatsii otrabotannykh masel, a takzhe zhidkikh organicheskikh radioaktivnykh otkhodov [Potential of using hydrocarbon oxidizing microorganisms for disposal of waste oils and organic liquid radioactive waste]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchennykh. Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk* [Proc. XI Int. Conf. of stud. and young scientists. Prospects for development of fundamental sciences]. Tomsk, 2014. pp. 520–523.
2. Safiullin A.G., Khusnutdinov I.Sh., Shakirov A.Z., Zabbarov R.R., Khusnutdinov S.I. Modelling pilot plant for disposal of liquid oil waste by thermomechanical method. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2013, no. 10, pp. 269–270. In Rus.
3. Dyakov M.S., Soldatenko N.A., Gloushankova I.S. Justification of the choice of resource saving technologies of waste oils recycling. *Ecology and Industry of Russia*, 2011, no. 5, pp. 16–19. In Rus.
4. Cherednichenko R.O., Stankowski L., Dorogochinskaya V.A. State of the art of lubricant waste recycling in Russia. *Gubkin Russiian State University of Oil and Gas*, 2010, no. 2, pp. 81–85. In Rus.
5. Andryushkin A.Yu. Utilizatsiya zhidkikh uglevodorodnykh otkhodov [Salvaging fluid hydrocarbon departure]. *Industrial ecology*, 2012, no. 2, pp. 26–29.
6. Grigorov A.B. Complex processing of exhaust motor oils. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 2012, vol. 99, no. 5, pp. 40–44. In Rus.
7. Barişçi S., Öncel M.S. The disposal of combed cotton wastes by pyrolysis. *International Journal of Green Energy*, 2014, vol. 11, pp. 255–266.
8. Sevastyanov O.M., Zakharova E.E. Subsurface disposal of liquid industrial wastes of the oil and gas industry of Russia. *Neftgazovaya Geologiya. Teoriya i Praktika*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 1–21. In Rus.
9. Grabovnikov V.A., Borevskii B.V. Subsurface disposal of liquid wastes: achievements, problems, and prospects. *Environmental geoscience*, 2011, no. 6, pp. 512–523. In Rus.
10. Liu C., Cao L., Ma P., Wang J., Rong S., Han S., A novel one-step flocculation method for recycling wasterolling oil. *Energy Sources. P. A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2016, vol. 38, pp. 2043–2049.

11. Xiong K., Zhou L., Zhang X.-M., Jiang G.-M., Lv X.-S. Research progresses of catalytic regeneration of waste oils. *Modern Chemical Industry*, 2016, vol. 36, pp. 53–57.
12. Yang Y., Li H., Gao W. Regeneration of waste lubricating-oil by extraction-flocculation. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2015, vol. 46, pp. 84–88.
13. Bogatu L., Onutu I., Cursaru D. New alternative for conditioned oils revaluation. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2015, vol. 21, pp. 222–232.
14. Len'kova A.V., Dolotovskii I.V. A plant for absorbent regeneration utilizing fuel wastes. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2013, vol. 49, pp. 517–521.
15. Emeshev V.G., Parovinchak M.S. Bez privoznoy energetiki [Without imported energy]. *Neftegazovaya vertikal*, 2005, no. 17, pp. 63–65.
16. Arsenijević Z., Grbavčić Z., Grbić B., Radić N., Garić-Grulović R., Miletić S., Savčić G., Dorđević B. Fluidized bed combustion of pesticide-manufacture liquid wastes. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2010, vol. 75, pp. 523–535.
17. Al-attab K.A., Ho J.C., Zainal Z.A. Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, vol. 62, pp. 1–8.
18. Chen X.-R., Li X.-S., Chen Z.-Y., Zhang Y., Yan K.-F., Lv Q.-N. Experimental investigation into the combustion characteristics of propane hydrates in porous media. *Energies*, 2015, vol. 8, pp. 1242–1255.
19. Dolgov S.V., Zavorin A.S., Dolgikh A.Yu., Subbotin A.N. Testing the flameless combustion and infrared radiation burner. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 39–42. In Rus.
20. Zavorin A.S., Dolgikh A.Yu., Fissenko R.N., Dolgov S.V. Aerodynamic testing of a burner. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 33–37. In Rus.
21. Dolgov S.V., Klochko K.I., Tabakaev R.B. Tests of the burning device. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 2, pp. 38–41. In Rus.
22. Dolgov S., Savchenko E., Khaustov S., Tabakaev R., Zavorin A. Disposal of liquid combustible wastes using flameless burners with porous carbon matrix. *EPJ Web of Conferences*, 2016, vol. 110, pp. 1–5 (01074).
23. *Teplovoy raschet kotlov (Normativny metod)* [Boiler thermal design (standard approach)]. St-Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p.
24. Vasiliev A.V., Antropov G.V., Sizonenko A.A. Sravnitelny analiz parovykh i vodogreynykh kotlov dlya promyshlennykh i otopitelnykh kotelnykh [Comparative analysis of steam and hot water boilers for industrial and heating boiler houses]. *Industrial power*, 2003, no. 9, pp. 18–23.
25. Veres A.A., Nosova T.V., Malov A.V. Prospects of block boiler using as a source of heating hot water boilers fire-tube «Turboterm guarantor». *Energy Saving and Water Treatment*, 2010, no. 4, pp. 27–28. In Rus.
26. Patiño D., Crespo B., Porteiro J., Míguez J.L. Experimental analysis of fouling rates in two small-scale domestic boilers. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 100, pp. 849–860.
27. Zhabo V.V. *Okhrana okruzhayushhey sredy na TES i AES* [Environmental protection at thermal power stations and nuclear power stations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p.

Received: 13 September 2016.

Information about the authors

Sergey V. Dolgov, engineer, MUE «Teplosnabzhenie».

Sergey A. Khaustov, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.