

## Термическая утилизация отработанных масел

© 2023. В. В. Семёнов<sup>1</sup>, д. т. н., профессор, В. И. Жданов<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,  
И. А. Синюков<sup>1</sup>, магистрант, М. В. Графкина<sup>2</sup>, д. т. н., профессор,

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

<sup>2</sup>Московский политехнический университет,  
107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38,  
e-mail: vasily\_semenov@mail.ru

Загрязнение окружающей среды нефтепродуктами является серьёзной экологической проблемой. Существует несколько способов утилизации отработанных масел: регенерация, захоронение и сжигание. Сжигание отработанных масел широко распространено как в России, так и за рубежом. Одним из существенных недостатков метода является поступление в атмосферу вредных веществ. Представлены результаты исследований по разработке более совершенной установки термической утилизации отработанных масел, обеспечивающей полноту сгорания и сокращение вредных выбросов. Установка для термической утилизации отработанных масел состоит из печи и эмульсионной форсунки.

Печь из топочной камеры и камеры дожигания дымового газа обеспечивает двухзонное, двухстадийное горение масла. В топочной камере происходит сжигание масла (1-ая зона горения с  $t \approx 600-700$  °C). Затем дымовой газ поступает в камеру дожигания, где происходит полное его сгорание за счёт подвода дополнительного воздуха (2-ая зона горения с  $t \approx 1200-1300$  °C), благодаря повышению температуры токсичные вещества, содержащиеся в дыме, превращаются в безвредные за счёт полного их окисления.

Эмульсионная форсунка состоит из пересекающихся канавок, которые при подаче в неё воздуха и нагретого масла обеспечивают мелкодисперсное распыление масла путём образования во встречных канавках газожидкостных вихрей. С использованием программы ANSYS проведён расчёт угла факела эмульсионной форсунки. Установлено, что для изменения дальности факела распыления и применения эмульсионных форсунок в печах разного объёма и мощности необходимо менять угол направления шнека.

Данное исследование способствует развитию отрасли переработки отходов производства и потребления. Предлагаемое решение позволяет применять установку не только в промышленных центрах, где накапливаются значительные объёмы отработанных масел, но и в малонаселённых пунктах, а также обеспечивает полноту сгорания нефтеотходов и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** термическая утилизация, отработанные масла, печь с двухфазным горением, топочная камера, камера дожигания, эмульсионная форсунка, факел распыления.

## Thermal disposal of waste oils

© 2023. V. V. Semenov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-7651-9377, V. I. Zhdanov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0002-7949-0147,  
I. A. Sinyukov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-6130-2092, M. V. Grafkina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7168-5228\*

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4, Volokolamsk highway, Moscow, Russia, 125993,

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University,  
38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, Russia, 107023,  
e-mail: vasily\_semenov@mail.ru

Pollution of the environment with petroleum products is a serious environmental problem. There are several ways to dispose of used oils: regeneration, burial and incineration. The burning of waste oils is widespread both in Russia and abroad. One of the significant disadvantages of the method is the entry of harmful substances into the atmosphere. The results of research on the development of a more advanced installation of thermal utilization of waste oils, ensuring the completeness of combustion and reduction of harmful emissions, are presented. The unit for thermal disposal of waste oils consists of a furnace and an emulsion nozzle.

The furnace from the furnace chamber and the afterburning chamber of the flue gas provides two-zone, two-stage oil gorenje. Oil is burned in the combustion chamber (1st gorenje zone with  $t \approx 600-700$  °C). Then the smoke enters the afterburning chamber, where it is completely burned due to the supply of additional air (2nd gorenje zone with  $t \approx 1200-1300$  °C), due to the increase in temperature, toxic substances contained in the smoke are transformed into harmless due to their complete oxidation.

The emulsion nozzle consists of intersecting grooves, which, when air and heated oil are fed into it, provide finely dispersed oil spraying by forming gas-liquid vortices in the oncoming grooves. Using the ANSYS program, the calculation of the flame angle of the emulsion nozzle was carried out. It is established that to change the range of the spraying torch and the use of emulsion nozzles in furnaces of different volume and power, it is necessary to change the angle of the screw direction.

This research contributes to the development of the industry of processing of production and consumption waste. The proposed solution allows the installation to be used not only in industrial centers where significant volumes of waste oils accumulate, but also in sparsely populated areas, and also ensures the completeness of combustion of oil waste and reduces the negative impact on the environment.

**Keywords:** thermal utilization, waste oils, two-phase gorenje, furnace chamber, afterburning chamber, emulsion nozzle, spray torch.

Загрязнение окружающей среды нефтепродуктами, в том числе и отработанными маслами (ОМ), является серьёзной экологической проблемой и приводит к морфологическим и структурным изменениям почвы и нарушению экологического баланса в наземных биомах [1, 2]. Вместе с ОМ в почву попадают и тяжёлые металлы, что повышает риски для здоровья человека [3]. По некоторым оценкам в литосферу и гидросферу сбрасывается до 84% всех ОМ [4].

В настоящее время наиболее распространены следующие методы утилизации ОМ: захоронение, регенерация, сжигание.

Захоронение ОМ не следует рассматривать как способ утилизации, поскольку это скорее откладывание решения проблемы загрязнения окружающей среды на некоторый отдалённый период.

Наиболее широко в России и за рубежом применяются методы регенерации (восстановления) или сжигания ОМ [4, 5]. Опубликованы исследования, представляющие преимущества и недостатки данных методов [6–8]. В первом случае при обработке ОМ удаляются примеси и получают качественные масла, которые могут быть добавлены в технологии создания новых смазочных масел.

Термическая утилизация промышленных и коммунальных отходов – широко распространённый метод по борьбе с отходами и загрязнением окружающей среды [9, 10]. Среди главных достоинств термической утилизации ОМ следует отметить возможность утилизировать их большие объёмы. Также в процессе сжигания производится полезная тепловая энергия, которая может быть использована для отопления помещений.

При сжигании ОМ в котлах или печах в атмосферу поступают вредные вещества, такие, как высокодисперсная пыль, состоящая из минеральных частиц и несгоревших остатков органических веществ; вредные газы, представляющие собой водяной пар, оксиды

азота, диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), соединения тяжёлых металлов, а также продукты неполного сгорания масла (полиароматические и другие углеводороды), концентрации которых могут превышать ПДК. В среднем при сжигании 1 т отработанного масла в атмосферу выбрасывается около 7 тыс. м<sup>3</sup> вредных газов и золы.

Таким образом, проблема снижения загрязнения атмосферы при термической утилизации ОМ является весьма актуальной задачей.

Цель исследования – создание установки для термической утилизации ОМ, обеспечивающей полноту сгорания ОМ и снижение негативного воздействия на атмосферу. В ходе исследования решались следующие задачи: разработка технологической схемы установки; исследование и разработка газожидкостной эмульсионной форсунки; расчёт угла факела эмульсионной форсунки.

### Объекты и методы исследования

Предлагаемая установка для термической утилизации ОМ обеспечивает полноту сгорания ОМ и снижение вредных выбросов в атмосферу.

На рисунке 1 (см. цв. вкладку I) представлена технологическая схема термической утилизации отработанного масла. Перед сжиганием ОМ в качестве предварительной подготовки применяется его нагрев до жидкого текучего состояния в теплообменнике (3).

Масло (2), нагретое до жидкого текучего состояния, и воздух (1) подаются в эмульсионную форсунку (6). Масло также проходит предварительную очистку на фильтре (4). С помощью вентилятора (8) воздух подаётся в печь (7) для поддержания процесса горения и охлаждения стенок печи.

Как известно, для полного сгорания каждого вида горючего требуется определённый объём окислителя, соотношение которых на-

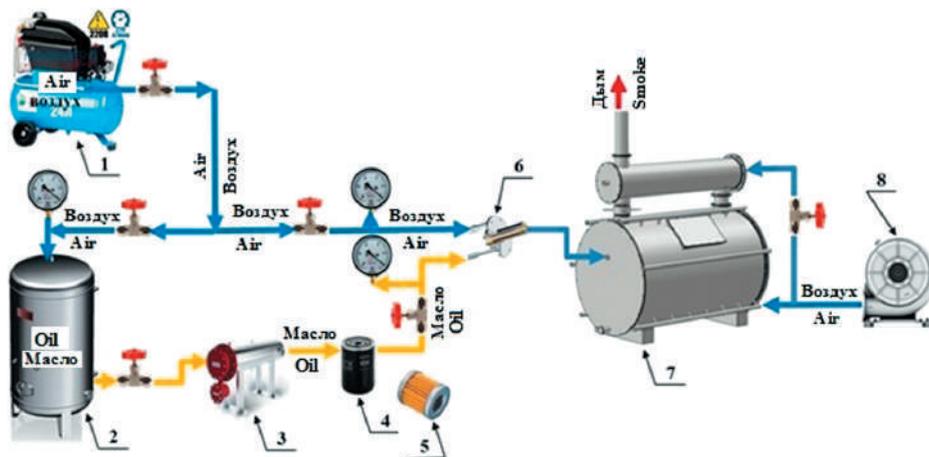


Рис. 1. Технологическая схема установки для термической утилизации отработанного масла, где: 1 – воздушный компрессор, 2 – бак для хранения масла, 3 – теплообменник, 4 – масляный фильтр, 5 – сменный картридж, 6 – эмульсионная форсунка, 7 – печь, 8 – вентилятор

Fig. 1. Technological scheme of the installation for thermal disposal of waste oil, where: 1 – air compressor, 2 – oil storage tank, 3 – heat exchanger, 4 – oil filter, 5 – replaceable cartridge, 6 – emulsion nozzle, 7 – furnace, 8 – fan

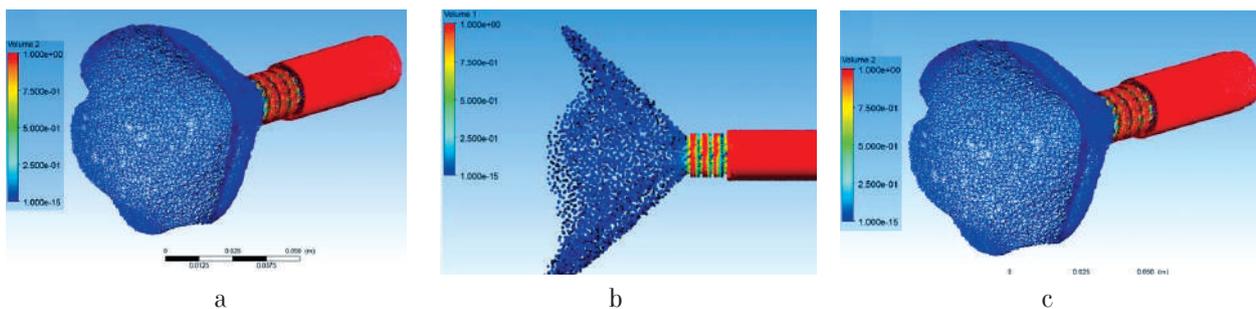


Рис. 3. Результаты расчётов факела: а) факел распыла под углом 30°; б) факел распыла под углом 60°; в) факел распыла под углом 60° (повёрнут)  
 Fig. 3. The results of calculations of the torch: а) the spray torch at an angle of 30°; б) spray torch at an angle of 60°; в) spray torch at an angle of 60° (rotated)

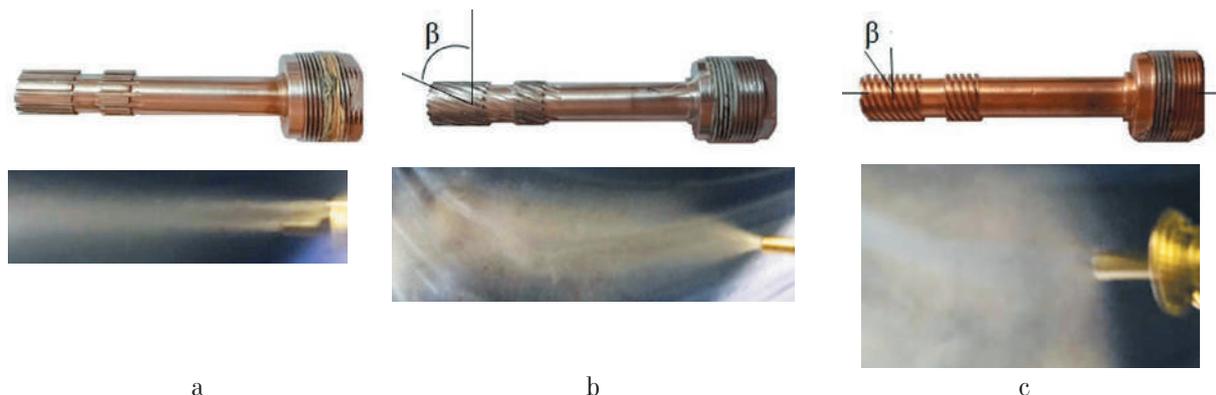


Рис. 4. Эмульсионные форсунки и факелы распыла: а) буртик эмульсионной форсунки с продольными канавками и её факел распыла; б) эмульсионная форсунка – канавки выполнены в виде шнеков под углом 60° и её факел распыла; в) эмульсионная форсунка – канавки выполнены в виде шнеков под углом 30° и её факел распыла / Fig. 4. Emulsion nozzles and spray torches: а) the collar of the emulsion nozzle with longitudinal grooves and its spray torch; б) emulsion nozzle – grooves are made in the form of augers at an angle of 60° and its spray torch; в) the emulsion nozzle – grooves are made in the form of augers at an angle of 30° and its spray torch

зывается стехиометрическим. Так как через эмульсионную форсунку подаётся то количество воздуха, которое необходимо только для достижения мелко дисперсного распыления жидкого топлива, то в топочную камеру печи должен подаваться воздух (8) в соответствии со стехиометрическим соотношением для полного сгорания в печи горючей смеси, которое необходимо для утилизации токсичных веществ, содержащихся в дымовых газах, путём их полного окисления.

Однако, в связи с тем, что печь состоит из двух камер сгорания, то в топочную камеру должна подаваться обогащённая горючая смесь с тем, чтобы в камере дожигания соблюдалось стехиометрическое соотношение компонентов топлива, то есть в камере дожигания будет происходить досжигание недосгоревшего топлива.

Таким образом, с целью обеспечения полноты сгорания жидкого топлива и полной утилизации токсичных веществ было принято решение организовать в печи двухзонное, двухстадийное горение за счёт установки камеры дожигания.

**Печь с двухзонным горением.** Печь для термической утилизации ОМ состоит из топочной камеры и камеры дожигания дымового газа, благодаря чему в печи осуществляется двухзонное, двухстадийное горение масла. В топочной камере при температуре 600–700 °С происходит сжигание масла (1-ая зона горения), а в камере дожигания обеспечивается дожигание недосгоревшей части масла, содержащейся в дымовом газе, за счёт повышения температуры до 1200–1300 °С, которое достигается путём подвода в камеру дожигания дополнительного воздуха (2-ая зона горения) [11, 12].

**Эмульсионная форсунка.** Все центробежные форсунки имеют цилиндрическую камеру, в которой происходит закручивание потока жидкости. Жидкость попадает в цилиндрическую камеру по каналам, образованным тангенциально в её стенке, в результате чего внутри камеры получается вращательное движение [11]. Далее жидкость, вращаясь внутри камеры закручивания, истекает через сопло форсунки под заданным углом факела. При этом за пределами форсунки жидкость распадается за счёт центробежной силы на мелкие капли.

При утилизации ОМ необходимо учитывать следующие условия:

1. ОМ – это низкокалорийное топливо, которое горит коптящим пламенем с образованием высокой дымности.

2. Компоненты топливной смеси обладают довольно высокой вязкостью.

Исходя из этого необходимо спроектировать двухкомпонентную форсунку, которая будет обладать большим корневым углом, обеспечивающим мелкодисперсное и равномерное распыление.

Полнота сгорания топлива зависит также от того, как приготовлена горючая смесь, то есть от мелкодисперсности распыления жидкого топлива.

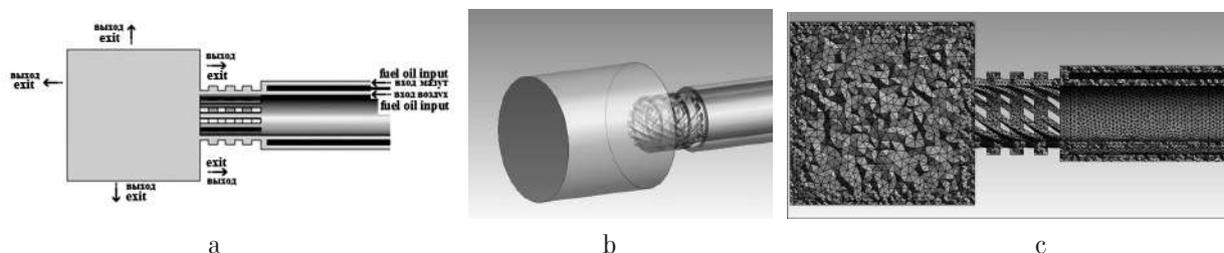
Для мелкодисперсности распыления жидкого топлива (ОМ) предложена эмульсионная форсунка (рис. 2), обеспечивающая необходимое качество [12].

Эмульсионная форсунка представляет собой газожидкостную форсунку, состоящую из двух соосно установленных друг в друга цилиндров (рис. 2). У обоих цилиндров имеются на концах цилиндрические буртики, на которых выполнены прямоугольные канавки. При этом у внешнего цилиндра прямоугольные канавки имеют поперечную форму с внутренней его стороны, а у внутреннего – с наружной его стороны образованы либо по всему его периметру продольные прямоугольные канавки, либо в виде шнека с винтовым направлением закрутки прямоугольных канавок, вследствие чего при их сочленении они образуют эмульсионную форсунку с пересекающимися канавками.

**Расчёт угла факела эмульсионной форсунки.** С целью определения угла распыла двухфазной смеси (масло + воздух) и структуры их смешения между собой внутри эмульсионной форсунки были проведены вычислительные исследования её характеристик с привлечением программы ANSYS, в которой в качестве модельного сочетания компонентов топлива использовалась пара «солярка + воздух». Методика расчёта соответствует [13].

Геометрия объекта создавалась в CAD-программе «SolidWorks». Модель выполнялась для частного расчёта и потому включает только конечную часть с зонами смешения и выходной частью для оценки факела распыла.

Сетка строится в приложении пакета программы CFX-Mesh. Решение любых гидродинамических задач, будь то задачи о ламинарном или турбулентном течениях, требуют значительных вычислительных ресурсов. Как правило, моделирование проводится на относительно плотных расчётных сетках и требует решения уравнений для многих переменных. Поэтому желательно использовать как можно более простую сетку (CFX-Mesh), которая, тем



**Рис. 2.** Модели для расчёта: а) модель эмульсионной форсунки; б) канавки в виде шнека 30°; в) расчётная сетка для форсунки со шнеком  
**Fig. 2.** Models for calculation: a) model of an emulsion nozzle; b) grooves in the form of a screw 30°; c) calculation grid for a nozzle with a screw

не менее, сохраняет все детали моделируемого течения.

Расчёты проводили с использованием модели турбулентности – SST, которая представляет собой комбинацию k-ε и k-ω моделей турбулентности. Для расчёта течения в свободном потоке используются уравнения k-ε модели, а в области вблизи стенок — уравнения k-ω модели. В данной задаче расчёт сошёлся на 371 итерации после 8 часов расчёта с параметрами сходимости по невязкам 0,000001 и схождению балансов 0,01. Результаты расчётов обрабатываются и визуализируются.

Исходные данные для расчёта:

- плотность воздуха –  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;
- молярная масса –  $\mu = 28,96 \text{ г/моль}$ ;
- плотность дизтоплива –  $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ ;
- молярная масса –  $\mu = 167 \text{ г/моль}$ .

Граничные условия на входе:

- скорость подачи воздуха – 5 м/с;
- скорость подачи дизтоплива – 5 м/с.

Граничные условия на выходе:

- среднее выходное давление – 0,1 МПа.

Шнековые каналы на входе в камеру закручивания форсунки в количестве 4 шт. были выполнены с сечением квадратной формы со сторонами в 1,5 мм. Общая площадь каналов  $F_{\text{вх}} = 9 \text{ мм}^2$ .

На рисунке 2а приведена модель эмульсионной форсунки (продольный разрез). На рисунке 2б представлена эмульсионная форсунка, в которой у внутреннего цилиндра на буртике с наружной его стороны имеются прямоугольные канавки в виде шнека с винтовым направлением закрутки под углом 30°.

Расчётная сетка для эмульсионной форсунки с канавками в виде шнеков состояла из 288500 элементов. Она представлена на рисунке 2с.

На рисунке 3 (см. цв. вкладку I) представлены результаты расчётов факела распыления дизтоплива путём смешивания с воздухом

при их подаче в эмульсионную форсунку. Видно, что факел распыления дизтоплива составляет 30 и 60°.

### Результаты и обсуждение

По результатам расчёта была изготовлена и испытана на стенде газожидкостная эмульсионная форсунка. Эксперимент направлен на сравнение работы эмульсионной форсунки при разных формах проточных каналов.

Для экспериментального исследования углов факела распыления жидкости была изготовлена эмульсионная форсунка с тремя формами внутренних канавок.

Первый эксперимент проводился с эмульсионной форсункой, внешний буртик которой был выполнен в виде продольных канавок в количестве 12 штук, имеющих квадратную форму в сечении и размером 1,5 мм × 1,5 мм. Результаты эксперимента представлены на рисунке 4а (см. цв. вкладку I).

Как видно из рисунка 4а (см. цв. вкладку I), факел распыла такой форсунки обладает высокой дальностью, но при этом угол распыления небольшой и неравномерный, вследствие чего не обеспечивается полнота сгорания горючей смеси, располагающейся в объёме по краям печи.

Второй эксперимент проводился с форсункой, буртик которой выполнен в виде шнека с углом  $\beta = 60^\circ$ . Результаты представлены на рисунке 4б (см. цв. вкладку I). Количество канавок – 12 штук, канавки имеют квадратную форму в сечении, размером 1,5 мм × 1,5 мм.

Как видно из рисунка 4б, при такой конструкции эмульсионной форсунки факел распыления обладает высокой мелкостворностью и дисперсностью, равномерностью и достаточной дальностью.

Третий эксперимент проводился с форсункой, буртик которой выполнен в виде шне-

ка с углом  $\beta = 30^\circ$  (рис. 4с, см. цв. вкладку I). Количество каналов составляет 5 штук, имеют квадратную форму в сечении, размером  $1,5 \text{ мм} \times 1,5 \text{ мм}$ .

Из рисунка 4с видно, что форсунка обладает максимально широким углом распыла. При этом наблюдается низкая дальнобойность. Газожидкостная пелена располагается в непосредственной близости возле форсунки. Факел имеет профиль полого конуса. Такой тип шнека подходит для распыления топливной смеси в печах маленького размера, где нет необходимости в дальнобойности.

Таким образом, в зависимости от типа и размера печи в эмульсионной форсунке, угол установки шнеков можно менять. Так, для более компактных печей подойдёт форсунка с углом наклона шнеков  $\beta = 30^\circ$ , она обеспечит высокую мелкодисперсность и небольшую дальнобойность. Для печи среднего размера подойдёт форсунка с углом наклона шнеков  $\beta = 60^\circ$ , а для печи с большими размерами – форсунка с продольными канавками, обеспечивающая большую дальнобойность.

Данное исследование способствует реализации задач, содержащихся в Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утверждённых распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р, а также соответствует современным решениям по переработке отходов [14].

Предложенная установка для термической утилизации отработанного масла при использовании различных видов эмульсионных форсунок (эмульсионная форсунка с продольными канавками, эмульсионные форсунки с канавками, выполненными в виде шнеков под углами  $60^\circ$  или  $30^\circ$ ) позволяет вести утилизацию ОМ не только в промышленных центрах, где накапливаются значительные объёмы ОМ, но и на предприятиях в малонаселённых пунктах России, решая таким образом актуальные экологические проблемы утилизации ОМ и снижения негативного техногенного воздействия на атмосферу.

### Выводы

С целью термической утилизации ОМ и снижения негативного воздействия на атмосферу создана установка, состоящая из двухзонной печи, представляющей собой топочную камеру и камеру дожигания, и из

эмульсионной форсунки с пересекающимися канавками.

Показано, что в топочной камере печи происходит сжигание масла при температуре  $t \approx 600\text{--}700^\circ\text{C}$  (1-ая зона горения), а в камере дожигания – полное сгорание дымового газа при температуре  $t \approx 1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ , которая достигается за счёт подвода дополнительного воздуха (2-ая зона горения), благодаря чему токсичные вещества, содержащиеся в дымовом газе, превращаются в безвредные за счёт полного их окисления.

Экспериментально определены факелы распыления различных эмульсионных форсунок, которые позволяют использовать их в печах разного объёма и мощности, что позволяет использовать разработанную установку на предприятиях в малонаселённых пунктах России по утилизации ОМ и снижению тем самым негативного техногенного воздействия на атмосферу.

### Литература

1. Лямзин В.И., Бухарина И.Л., Здобяхина О.В., Исупова А.А. Влияние высших растений в консорциуме с микроорганизмами на агрохимические показатели при биоремедиации нефтезагрязнённых земель // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 166–171.
2. Куликова О.А., Терехова В.А., Маслова Е.А., Нишкевич Ю.А., Кыдралиева К.А. Экоотоксикологические характеристики нефтезагрязнённых грунтов (шламов) после их реагентной обработки // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 120–126.
3. Grafkina M.V., Pitryuk A.V. Analysis and evaluation of the database on soil contamination of the Moscow Region with heavy metals // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 723. No. 4. Article No. 042016.
4. Зачиняев Я.В., Иванюк С.В., Титова Т.С. Критерии оценки воздействия отработанных масел на окружающую природную среду. Обзор технологий регенерации отработанных масел // NovaInfo. 2011. № 3 [Электронный ресурс] <https://novainfo.ru/article/224> (Дата обращения: 29.09.2023).
5. Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. Final report. December 2001 [Электронный ресурс] [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste\\_oil.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil.pdf) (Дата обращения: 29.09.2023).
6. Hsu Y.-L., Liu C.-C. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology // Environmental Monitoring and Assessment. 2011. V. 176. P. 197–212.
7. Лытов В.М., Комков В.И. Разработка технологии утилизации отработанных моторных масел, образу-

щихся на территории г. Москвы, методом сжигания // *Международный студенческий научный вестник*. 2017. № 4-5 [Электронный ресурс] <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17491> (Дата обращения: 30.09.2023).

8. Камбулова Е.А., Попов В.Г. Переработка отработанных нефтепродуктов с получением вторичных материальных ресурсов // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2019. № 2 [Электронный ресурс] <https://resources.today/PDF/04ECOR219> (Дата обращения: 30.09.2023).

9. Nixon J.D., Wright D.G., Day P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerator in the UK // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 2234–2244.

10. Adrados A., De Marco I., Lopez-Urionabarrenechea A., Caballero B.M., Laresgoiti M.F. Pyrolysis behavior of different type of materials contained in the rejects of packaging waste sorting plants // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 52–59.

11. Семёнов В.В., Жданов В.И., Веретенников И.Ю., Хиль А.Ю. Способ утилизации мусорных свалок в малонаселённых пунктах России // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 3. С. 4–9.

12. Семёнов В.В., Жданов В.И. Устройство для термической утилизации водного раствора токсичных веществ // Патент на изобретение RU. № 2789002. 2023. Дата публикации: 26.01.2023 Бюлл. № 3.

13. Курпатенков В.Д., Кесаев Х.В. Расчёт форсунок двигателя. М.: МАИ, 1987. 52 с.

14. Корольков М.В., Мажуга А.Г. Основы государственной политики Российской Федерации по созданию новой отрасли переработки промышленных отходов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 4. С. 6–12.

## References

1. Lyamzin V.I., Bukharina I.L., Zdobychkina O.V., Isupova A.A. Influence of higher plants in a consortium with microorganisms on agrochemical parameters during bioremediation of oil-contaminated lands // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 166–171 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

2. Kulikova O.A., Terekhova V.A., Maslova E.A., Nishkevich Yu.A., Kydralievа K.A. Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludge) after their reagent treatment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 120–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-120-126

3. Grafkina M.V., Pitryuk A.V. Analysis and evaluation of the database on soil contamination of the Moscow Region with heavy metals // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 4. P. 042016. doi: 10.1088/1755-1315/723/4/042016

4. Zachinyaev Ya.V., Ivanyuk S.V., Titova T.S. Criteria for assessing the impact of waste oils on the environment. Review of waste oil regeneration technologies // *NovaInfo*. 2011. No. 3 [Internet recourse] <https://novainfo.ru/article/224> (Accessed: 29.09.2023) (in Russian).

5. Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. Final report. December 2001 [Internet recourse] [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste\\_oil.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil.pdf) (Accessed: 29.09.2023)

6. Hsu Y.-L., Liu C.-C. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. V. 176. P. 197–212. doi: 10.1007/s10661-010-1576-3

7. Lykov V.M., Komkov V.I. Development of technology for utilization of used motor oils formed on the territory of Moscow by incineration // *International Student Scientific Bulletin*. 2017. No. 4-5 [Internet recourse] <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17491> (Accessed: 30.09.2023) (in Russian).

8. Kambulova E.A., Popov V.G. Recycling of waste materials using secondary mathematical resources // *Waste and resources*. 2019. No. 2 [Internet recourse] <https://resources.today/PDF/04ECOR219.pdf> (Accessed: 30.09.2023) (in Russian). doi: 10.15862/04ECOR219

9. Nixon J.D., Wright D.G., Day P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerator in the UK // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 2234–2244

10. Adrados A., De Marco I., Lopez-Urionabarrenechea A., Caballero B.M., Laresgoiti M.F. Pyrolysis behavior of different type of materials contained in the rejects of packaging waste sorting plants // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 52–59. doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.016

11. Semenov V.V., Zhdanov V.I., Veretennikov I.Yu., Khil A.Yu. A method of recycling landfills in sparsely populated areas of Russia // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. V. 25. No. 3. P. 4–9 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-3-4-9

12. Semenov V.V., Zhdanov V.I. Device for thermal utilization of an aqueous solution of toxic substances // Patent for invention RU. No. 2789002. 2023. Date of publication: 26.01.2023 Byul. No. 3 (in Russian).

13. Kurpatenkov V.D., Kesaev H.V. Calculation of engine injectors. Moskva: MAI, 1987. 52 p. (in Russian).

14. Korolkov M.V., Majuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation on the creation of a new branch of industrial waste processing // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012