



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВАЛОЧНОГО ГАЗА В ГАЗОТУРБИННЫХ И ГАЗОПОРШНЕВЫХ УСТАНОВКАХ: ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ\*

*А.А. Федотов<sup>1,2</sup>, Д.А. Каранова<sup>1,2</sup>, А.Б. Тарасенко<sup>2</sup>, С.В. Киселёва<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет Московский энергетический институт

д. 14, ул. Красноказарменная, Москва, 111250, Россия

тел.: +7(495) 362-70-01; e-mail: monolitk3@gmail.com

<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН

д. 13, ул. Ижорская, Москва, 125412, Россия

тел.: +7(495)485-93-90; e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

<sup>3</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

д. 1, ул. Ленинские горы, Москва, 119991, Россия

тел.: +7(495)939-42-57; e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.017-028

Заключение совета рецензентов: 15.07.19. Заключение совета экспертов: 17.07.19. Принято к публикации: 19.07.19.

Рост современных мегаполисов сопровождается значительным увеличением ежегодно образующихся объемов твердых коммунальных отходов. В России в настоящее время основным способом утилизации отходов является вывоз на полигоны. Бесконтрольная эмиссия биогаза, образующегося в теле полигона в результате анаэробного брожения биомассы, приводит к выбросу в окружающую среду целого ряда газообразных компонентов, в том числе токсичных, а также к самовозгоранию полигонов. В то время как биогаз следует рассматривать в качестве ценного энергетического продукта, использование которого может сыграть существенную роль в локальной энергетике.

Представлены результаты технико-экономического анализа работы энергоустановок на свалочном газе. Сделан расчет ежегодной эмиссии метана на полигоне «Ядрово». Проведен сравнительный анализ газотурбинных и газопоршневых установок при работе на газовом топливе с низким содержанием метана. Рассмотрены два потенциальных варианта решения проблемы с помощью традиционных энергетических установок. Описан принцип работы таких энергетических установок, а также их достоинства и недостатки. Для оценки экономической эффективности произвелись расчеты приведенной стоимости электрической энергии. Были получены данные по стоимости кВт·ч на разных электрогенерирующих агрегатах, а также стоимость установленного кВт мощности электростанции. Энергетический потенциал полигона «Ядрово» оценен в 365 МВт·ч в год, следовательно, в месяц такая электростанция может обеспечивать необходимой электроэнергией 100 человек, поскольку среднестатистический житель Москвы потребляет 250–300 кВт·ч в месяц. Изучен зарубежный опыт эксплуатации электростанций, работающих на свалочном газе. Перечислены основные проблемы использования свалочного газа, приведены достоинства и недостатки электростанций с газопоршневыми и микрогазотурбинными силовыми агрегатами, даны рекомендации по выбору энергетической установки. Кроме того, представлена информация по выводу свалочного газа на полигонах, находящихся в разных географических местах: Москва, Владивосток, Kamphaeng Saen (Провинция в Таиланде). Благодаря этим данным установлена четкая корреляция климатической зоны и населения ближайшего населенного пункта с выходом био-

\* Федотов А.А., Каранова Д.А., Тарасенко А.Б., Киселёва С.В. Использование свалочного газа в газотурбинных и газопоршневых установках: энергетические и экономические оценки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;19-21:17-28.



газа. За основной параметр оценки выхода свалочного газа был принят удельный выход биогаза, то есть количество свалочного газа, получаемого с одного квадратного метра полигона.

Ключевые слова: свалочный газ; микрогазотурбинная установка; газопоршневая установка; стоимость электрической энергии.

## USE OF LANDFILL GAS IN GAS TURBINE AND GAS PISTON INSTALLATIONS: ENERGY AND ECONOMIC ASSESSMENTS

*A.A. Fedotov<sup>1,2</sup>, D.A. Karanova<sup>1,2</sup>, A.B. Tarasenko<sup>2,3</sup>, S.V. Kiseleva<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>National Research University Moscow Power Engineering Institute  
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow, 111250, Russia  
tel.: +7 (495) 362 70 01, e-mail: monolitk3@gmail.com

<sup>2</sup>Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
13/2 Izhorskaya Str., Moscow, 125412, Russia  
tel.: +7 (495) 485 93 90, e-mail: a.b.tarasenko@gmail.com

<sup>3</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography  
1 Leninskie Gori, Moscow, 119991, Russia  
tel.: +7 (495) 939 42 57, e-mail: k\_sophia\_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.19-21.017-028

Referred 15 July 2019 Received in revised form 17 July 2019 Accepted 19 July 2019

The growth of modern megacities is accompanied by a significant increase in the annually generated volumes of municipal solid waste. The main method of their disposal in Russia at present is the removal of waste to landfills. Uncontrolled emission of biogas generated in the body of the landfill as a result of anaerobic fermentation of biomass leads to the release of a number of gaseous components into the environment, including toxic ones, as well as spontaneous combustion of landfills. In addition, biogas should be considered as a valuable energy product, the use of which can play a significant role in local energy.

This paper presents the results of a feasibility study of the landfill gas power plants operation. We have made the calculation of annual methane emissions at the Yadrovo test site. The text provides a comparison of gas turbine and gas reciprocating units when working on gas fuel with low methane content. The paper considers two potential solutions to the problem using traditional power plants. The work describes the principle of operation of such power plants, as well as their advantages and disadvantages. In order to assess the economic efficiency, the present value of electric energy is calculated. Data are obtained on the cost of kWh at various power generating units, as well as the cost of installed kW of power of the power plant. The energy potential of the Yadrovo landfill is estimated at 365 MWh per year, in turn, the average Moscow resident consumes 250–300 kWh per month, that is, such a power station can provide 100 people with the necessary electricity per month. The paper discusses the experience of using landfill gas power plants abroad. The conclusion contains recommendations, as well as the main problems of using landfill gas, the advantages and disadvantages of power plants with gas piston and microgas turbine power units. Information is also provided on the release of landfill gas at landfills located in different geographical locations: Moscow, Vladivostok, Kamphaeng Saen (Province in Thailand). Thanks to these data, there is a clear correlation between the climate zone and the population of the nearest settlement with the release of biogas. The specific parameter of biogas output, that is, the amount of landfill gas received from one square meter of the landfill, is taken as the main parameter for estimating the yield of landfill gas.

Keywords: landfill gas; micro-gas turbine; combustion engine; levelised cost of energy.



Антон Андреевич Федотов  
Anton Fedotov

**Сведения об авторе:** стажер-исследователь лаборатории возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН.

**Образование:** магистр 2-го курса НИУ МЭИ.

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; электрохимическая энергетика; теплоэнергетика.

**Публикации:** 6.

**Information about the author:** Research Assistant, Laboratory for Renewable Energy, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences.

**Education:** Moscow Power Engineering Physics Institute, bachelor degree.

**Research interests:** renewable energy sources; electrochemical power; heat power.

**Publications:** 6.



Дарина Андреевна Каранова  
Darina Karanova

**Сведения об авторе:** стажер-исследователь лаборатории возобновляемых источников энергии Объединенного института высоких температур РАН.

**Образование:** магистр 2-го курса НИУ МЭИ.

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; электрохимическая энергетика, теплоэнергетика.

**Публикации:** 2.

**Information about the author:** Research Assistant, Laboratory for Renewable Energy, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences.

**Education:** Moscow Power Engineering Physics Institute, bachelor degree.

**Research interests:** renewable energy sources; electrochemical power, heat power.

**Publications:** 2.



Алексей Борисович  
Тарасенко  
Alexey Tarasenko

**Сведения об авторе:** старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии ОИВТ РАН.

**Образование:** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (2005 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; электрохимические накопители энергии, водородная энергетика.

**Публикации:** более 70, в том числе патентов на изобретения.

*h*-index 12 (по РИНЦ) 8

Scopus Author ID 36773802600

**Information about the author:** Senior Researcher at Renewable Energy Sources Laboratory of Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences.

**Education:** National Research Nuclear University MEPH, 2005.

**Research interests:** renewable energy sources, electrochemistry energy storages; hydrogen energy.

**Publications:** more than 70, including patents.



Софья  
Валентиновна Киселёва  
Sofia Kiseleva

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Образование:** физический факультет МГУ (1987 г.) и аспирантура того же факультета (1990 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

**Публикации:** более 100, в том числе патенты на изобретения.

*h*-index 12 (по РИНЦ)

ORCID 0000-0001-5836-8615

Research ID E-3324-2014

Scopus Author ID 57201352245

**Information about the author:** D.Sc. in Physics and Mathematics, Senior Scientific Worker of Renewable Energy Sources Laboratory at Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

**Education:** Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, 1987.

**Research interests:** renewable energy sources; resource evaluation; ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

**Publications:** more than 100, including patents.

## 1. Введение

Рост современных мегаполисов сопровождается значительным увеличением ежегодно образующихся объемов твердых коммунальных отходов (ТКО). Согласно данным Росприроднадзора, в России образовалось 70 млн т ТКО, и ежегодно их количество увеличивается на 3÷4 % [1]. Объем отходов коммунального сектора крупнейшего по численности населения региона – Московской области – составляет около 3,835 млн т в год [2]. В России в настоящее время основным способом утилизации ТКО является вывоз отходов на полигоны, как правило, без сортировки. Бесконтрольная эмиссия биогаза, образующегося в

теле полигона в результате анаэробного брожения биомассы (свалочного газа, landfill-газа), приводит к выбросу в окружающую среду целого ряда газообразных компонентов, в том числе токсичных, а также к самовозгоранию полигонов (табл. 1).

По состоянию на 2018 г. критическая ситуация, сопровождающаяся массовыми жалобами жителей прилегающих населенных пунктов, сложилась на трех полигонах в Московской области: Кучино (Балашихинский район), Алексинский карьер (Клинский район) и Ядрово (Волоколамский район) [4]. Утилизация отходов, увеличение доли их переработки и получения из них вторичных ресурсов приведет, в частности, к сокращению негативного воздействия на окружающую среду.

Таблица 1

Усредненный состав свалочного газа [3]

Table 1

The average composition of landfill gas [3]

Компонент	Содержание, % в сухом объеме
Метан	47,5
Диоксид углерода	47
Азот	3,7
Кислород	0,8
Алканы	0,1
Ароматические и циклические $CH_x$	0,2
Водород	0,1
Сероводород	0,01
Моноксид углерода	0,1
Другие следовые компоненты	0,5

В представленной статье проведена оценка выхода биогаза на примере полигона «Ядрово» Московской области, а также технико-экономических показателей его последующей утилизации с помощью традиционных тепловых машин. Блочные электро-

станции имеют низкий интегральный КПД, а технологии с высокотемпературными топливными элементами являются слишком дорогими, поэтому в работе будут рассмотрены два варианта: газопоршневая и газотурбинная установки (ГТУ и ГПУ).

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>C</i>	Инвестиции, USD
<i>DOC</i>	Доля потенциально разлагаемого органического вещества
<i>E</i>	Общая эмиссия метана от полигона, м <sup>3</sup> /год
<i>E<sub>t</sub></i>	Годовая выработка электроэнергии, кВт·ч
<i>F</i>	Доля метана, образующегося на полигоне
<i>LCOE</i>	Приведенная стоимость электроэнергии, USD/кВт·ч
<i>M</i>	Стоимость эксплуатации и обслуживания, USD
<i>MCF</i>	Коэффициент коррекции потока метана, отражающий глубину залегания отходов
<i>MSW</i>	Общее количество отходов, захороненных на полигоне за год, т/год
<i>n</i>	Время работы электростанции, год
<i>OX</i>	Коэффициент окисления
<i>ppm</i>	Миллионная доля
<i>R</i>	Утилизованный метан, м <sup>3</sup> /год
<i>r</i>	Ставка рефинансирования, %
<i>V</i>	Объем образовавшегося метана, м <sup>3</sup> /год
<i>Индексы нижние</i>	
<i>0</i>	Начальные значения
<i>f</i>	Фактическое значение
<i>t</i>	Значения, полученные в течение года
<i>x</i>	Количество атомов элемента в молекуле
<i>Аббревиатуры</i>	
ГПУ	Газопоршневая установка
ГТУ	Газотурбинная установка
МГТ	Микрогазотурбинная установка
ТКО	Твердые коммунальные отходы

## 2. Теоретическая часть.

### Свалочный газ: получение, сбор, применение

В настоящее время в мире разработаны и применяются разнообразные технологии переработки и утилизации ТКО (рис. 1), в том числе:

- биотермическое аэробное компостирование;
- анаэробная ферментация ТКО на полигонах с удалением и использованием свалочного газа;

– сепарация / сортировка ТКО и дальнейшая переработка вторичных ресурсов;

– термическая переработка ТКО (сжигание, пиролиз, газификация) с получением энергии и др.

Развитие энергетических технологий получения энергии из свалочного газа, с одной стороны, и рост масштабов и количества полигонов – особенно вблизи крупных мегаполисов, – с другой, позволяет рассматривать свалочный газ как стабиль-



ный и обладающий значительным потенциалом источник энергии. Начальным этапом процесса утилизации является создание системы сбора газа (сооружение скважин и трубопроводов, собирающих газ с объема полигона), если таковая система не была сооружена при строительстве полигона. При дальнейшем использовании свалочного газа в энергетических установках необходимо наличие

модуля очистки, удаляющего из газа наиболее опасные, с точки зрения окисления или шлакообразования, примеси (табл. 2). Зарубежный опыт показывает, что даже тепловые двигатели требуют предварительного удаления из топливного газа некоторых соединений, присутствие которых ведет к ускоренной деградации узлов и систем энергоустановок.

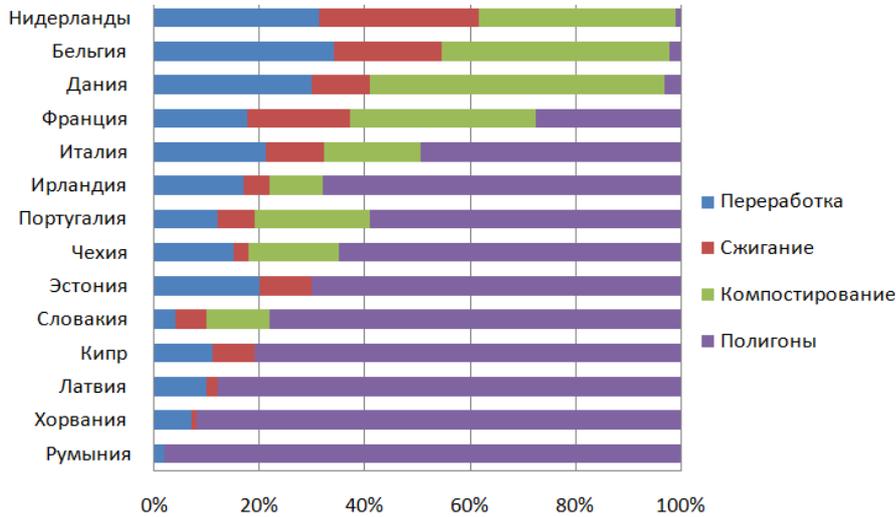


Рис. 1 – Соотношение объемов ТКО, перерабатываемых различными способами в странах Европейского Союза [5]  
Fig. 1 – Ratio of volumes of municipal solid waste (MSW) processed in various ways in the countries of the European Union [5]

Таблица 2  
Влияние примесей в неочищенном свалочном газе на работу энергетических установок [6]

Table 2  
The effect of impurities in the raw landfill gas on the operation of power plants [6]

Примеси в составе биогаза	Влияние на работу энергоустановок
Диоксид углерода	Коррозия металлических частей установки, снижение теплотворной способности газовой смеси, снижение детонационного свойства топливной смеси
Вода	Коррозия металлических частей установки
Азот	Снижение теплотворной способности газовой смеси, снижение детонационного свойства топливной смеси
Аммиак	Выбросы в окружающую среду NO <sub>x</sub> , снижение детонационного свойства топливной смеси
Сероводород	Отравление катализаторов, выбросы в окружающую среду SO <sub>2</sub>

Далее очищенный свалочный газ может быть переработан для получения энергетических продуктов с помощью различных технологий (рис. 2).

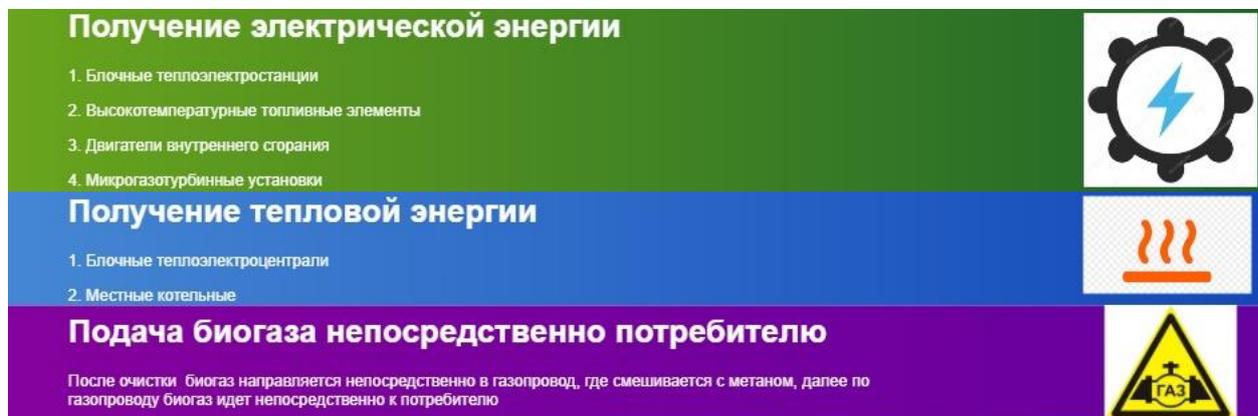


Рис. 2 – Пути утилизации свалочного газа с получением энергии [6]  
Fig. 2 – Ways of landfill gas utilization with energy generation [6]

### 2.1. Оценка объемов образования биогаза на типовом полигоне Московской области

На начальной стадии эксплуатации полигона органическая часть ТКО разлагается в аэробных условиях (с доступом кислорода), но после подсыпки новых объемов отходов, нижележащие слои уплотняются. В результате разложение продолжается в анаэробных условиях (без доступа кислорода). Получившийся биогаз поднимается в верхние слои полигона, где в аэробных условиях происходит частичное окисление метана до диоксида углерода [1].

Выделяют следующие основные фазы разложения органических отходов (рис. 3) [7]:

Фаза 1 – окисление в аэробных условиях.

Фаза 2 – распад продуктов гидролиза в анаэробных условиях.

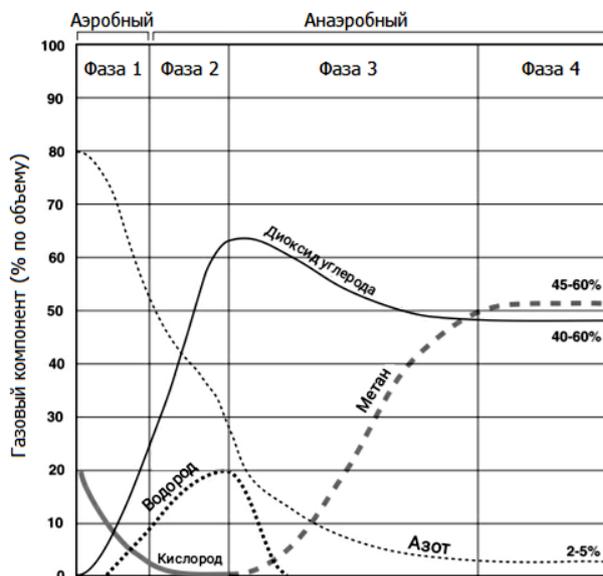
Фаза 3 – неустойчивое образование метана.

Фаза 4 – устойчивое образование метана в составе биогаза.

Таким образом, анаэробный процесс начинается на эксплуатационном этапе жизненного цикла полигона и заканчивается на пострекультивационном. В течение первых 2–7 лет после начала эксплуатации полигона начинаются процессы метаногенеза. После 12–17 лет условия метаногенеза сложились, устанавливается максимальный выход биогаза. Затем после 25–30 лет с момента закрытия полигона идет постепенное снижение потока биогаза до безопасных концентраций по метану [8]. В зависимости от климатических условий длина фаз может меняться.

Для оценки выхода метана в составе свалочного газа на полигоне «Ядрово» в Московской области и потенциала Московского региона в целом применялась методика определения эмиссии метана от поли-

гонов ТКО [10]. Предполагалось, что ежегодно образующийся объем свалочного газа соответствует количеству захороненных ежегодно ТКО (то есть весь объем отходов переходит в стадию активного метаногенеза).



Примечание: продолжительность фазы зависит от условий полигона

Рис. 3 – Динамика образования продуктов разложения органических отходов на полигонах ТКО [9]

Fig. 3 – Dynamics of formation of organic waste decomposition products at landfill MSW [9]

Тогда ежегодная эмиссия метана от полигона ТКО

$$E_{CH_4} = \left( MSW * MCF * DOC * DOC_f * F * \frac{16}{12} - R \right) * (1 - OX), \quad (1)$$

где  $MSW$  – общее количество отходов, захороненных на полигоне за год;  $MCF$  – коэффициент коррекции потока метана, отражающий глубину залегания отходов (принимается равным 0,6);  $DOC$  – доля потенциально разлагаемого органического вещества (определяется по составу отходов);  $DOC_f$  – доля  $DOC$ , которая фактически разлагается (типичное значение 0,77);  $F$  – доля метана в образующихся на свалках газах (типичное значение 0,5);  $16/12$  – коэффициент пересчета C в  $CH_4$ ;  $R$  – утилизированный метан ( $m^3/год$ , в наших расчетах принимается равным нулю);  $OX$  – коэффициент окисления (обычно 0).

Рассмотрим морфологический состав ТКО в Московской области (рис. 4).

Содержание в отходах разлагающегося органического вещества определяется по содержанию углерода в бумаге и тканевых материалах (40 %), пищевых отходах (15 %), непищевых отходах парков и садов (17 %), древесных отходах и соломе (30 %).



Рис. 4 – Морфологический состав ТКО [2]  
Fig. 4 – The morphological composition of MSW [2]

На основе данных по составу отходов можно определить содержание разлагающегося органического углерода (*DOC*):

*A* – бумага, тканевые материалы – 40 %;

*B* – непищевые органические отходы, способные к разложению – 17 %;

*C* – пищевые отходы – 15 %;

*D* – древесные отходы – 30 %.

Тогда *DOC* определяется как:

$$DOC = 0,4 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,3 * D \quad (2)$$

и составляет для Московского региона 0,181.

Быстрый рост полигона «Ядрово» был вызван закрытием других крупных полигонов Подмосковья. Всего в 2013–2017 гг. прекратили работу 24 из 39 действующих ранее в Московской области крупных свалок. На 2017 г. мощность полигона «Ядрово» была определена в 420 тыс. т отходов в год [11]. Именно на это значение ТКО был произведен расчет ежегодного образования метана, который составил 23,41 тыс. т/год, или  $36 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup>/год.

Если принять содержание метана в свалочном газе равным 47,5 %, в соответствии с данными табл. 1, то в среднем за время эксплуатации полигона объем образующегося свалочного газа равен  $76 \cdot 10^6$  (м<sup>3</sup>/год), или 8 676 (м<sup>3</sup>/час).

Как упоминалось, за рубежом многие полигоны после закрытия используются именно как источники биогаза, который перерабатывается с помощью традиционных тепловых машин (газотурбинные и газопоршневые установки).

Рассмотрим энергетическую и экономическую эффективность использования микрогазотурбинной и газопоршневой установок при конверсии свалочного газа.

### 3. Техничко-экономические оценки производства электрической энергии газотурбинной и газопоршневой установками при использовании свалочного газа

#### 3.1 Материалы и методы исследования

##### 3.1.1. Энергетические характеристики биогаза

Теплота сгорания биогаза зависит от содержания метана в нем и варьируется от 15 МДж/м<sup>3</sup> до 25 МДж/м<sup>3</sup>, что эквивалентно  $3\,600 \div 4\,800$  ккал/м<sup>3</sup> [11]. Это соответствует 50 % теплоты сгорания природного газа.

Как уже упоминалось, биогаз (и свалочный газ) перед использованием в энергетических установках проходит этап подготовки, в том числе, очистку от примесей. В общем случае процесс подготовки включает в себя удаление [11]:

- влаги и взвешенных частиц;
  - сероводорода (H<sub>2</sub>S);
  - галогеносодержащих соединений;
  - углекислого газа;
- а также

– сжатие или сжижение (при использовании в качестве горючего топлива для транспортных средств).

При использовании биогаза для генерации тепловой энергии его направляют на сжигание в котельные или на сжигание в факеле сушильной установки для сушки самого биогаза. Для производства электрической энергии возможно использование свалочного газа в газопоршневых и газотурбинных установках.

##### 3.2. Расчет технико-экономических показателей при выработке электроэнергии газопоршневой и микрогазотурбинной установками, работающими на свалочном газе

Предполагается, что мощность ГПУ составляет 500 кВт (табл. 3), период эксплуатации силовых агрегатов и полигона – 30 лет.

Таблица 3

Характеристики газопоршневой установки и топлива для установки

Table 3

Characteristics of the gas piston installation and fuel for installation

Установленная мощность, кВт	500
Срок службы, ч	262 800
Содержание метана, %	47,5
Потребление газообразного топлива, м <sup>3</sup> /час	245

ГПУ представляет собой двигатель внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием и искровым зажиганием горючей смеси в камере сгорания, работающий по циклу Отто и использующий в качестве топлива газ. Энергия, выделившаяся при сгорании топлива, в газовом двигателе производит механическую работу на валу, которая преобразуется в электрическую энергию.

Преимуществами газопоршневых установок являются:

- более высокий, чем у микротурбинной газовой установки (МГТ), электрический КПД;
- низкая зависимость КПД от электрической нагрузки;
- быстрый выход на номинальный режим работы относительно МГТ.

С другой стороны, при эксплуатации ГПУ необходима частая смена моторного масла (каждые 4 000 моточасов [21]), а количество выбросов в атмосферу превышает таковое у МГТ, что требует наличия ка-



тализаторов для дожигаания. Например, в процессе работы на газообразном топливе при сжигании 1 м<sup>3</sup> газа в микрогазотурбинном агрегате, содержание NO<sub>x</sub> и CO в отходящих газах составляет 25 ppm и 60 ppm соответственно. В газопоршневой установке в расчете на этот же объем топлива – 118 ppm NO<sub>x</sub> и 107 ppm CO [22].

В качестве основного экономического показателя работы ГПУ на свалочном газе была использована приведенная (выровненная) стоимость электроэнергии (LCOE). LCOE применяется для финансовой оценки производства электроэнергии различными методами и представляет собой минимальную стоимость электроэнергии, которая продается безубыточно в течение срока эксплуатации энергетической станции или установки.

При расчете LCOE учитываются первоначальные инвестиции в установку (капитальные затраты и затраты на строительство), а также операционные затраты на эксплуатацию и обслуживание установки и стоимость топлива в течение срока службы установки:

$$LCOE = \frac{C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (3)$$

где LCOE – приведенная стоимость электроэнергии [USD/кВт·ч]; C<sub>0</sub> – начальные инвестиции [USD]; M<sub>t</sub> – стоимость эксплуатации и обслуживания в год t [USD/год]; E<sub>t</sub> – годовая выработка электроэнергии в год [кВт·ч/год]; r – ставка рефинансирования, то есть размер процентов в годовом исчислении, подлежащих уплате центральному банку страны за кредиты, которые центральный банк предоставляет организации [%]; n – время работы установки (станции) [год]. Расчеты приведенной стоимости были проведены в предположении, что используется свалочный газ, выделяемый ежегодно полигоном ТКО «Ядрово» Московской области.

При экономических оценках были учтены: стоимость системы очистки свалочного газа, затраты на строительство, стоимость самого силового агрегата (табл. 4), эксплуатационные расходы и плата за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (оксиды азота, оксиды углерода). За основу стоимости установки по сбору и хранению биогаза, а также стоимости строительных и монтажных работ была взята стоимость электростанции, построенной в Таиланде в 2017 г.

Таблица 4  
Стоимость сооружения и обслуживания энергокомплекса с ГПУ при пересчете на паритет покупательной способности РФ на 2017 г. [13,14]

Table 4

The cost of construction and maintenance of the power complex with the GPI, in terms of parity purchasing power of the Russian Federation in 2017 [13,14]

Статья расходов	Расходы, USD
<b>Стоимость оборудования и строительные расходы</b>	
Газопоршневая установка мощностью 500 кВт	200 000
Установка сбора свалочного газа и хранения биогаза	460 000
Очистные сооружения для свалочного газа	40 000
Строительные работы (залвка фундамента под систему сбора биогаза, возведение помещений, монтаж установок)	67 000
<b>Эксплуатационные расходы</b>	
Эксплуатация и обслуживание ГПУ за все время проекта	7 000
Эксплуатация и обслуживание системы сбора и хранения свалочного газа за все время проекта	14 000
<b>Плата за выбросы при эксплуатации ГПУ</b>	
Плата за выбросы NO <sub>x</sub> за все время эксплуатации для России	900
Плата за выбросы CO за все время эксплуатации для России	55

Микрогазотурбинные агрегаты также могут быть рассмотрены в качестве производителей электрической энергии на свалочном газе. Принцип работы такого силового агрегата заключается в том, что свалочный газ смешивается с сжатым воздухом и воспламеняется в камере сгорания. Образующиеся горючие газы затем вращают ротор турбины. Уходящие газы после срабатывания в турбине имеют очень высокую температуру (500÷600 °С) и могут быть использованы для рекуперации тепла. Большая доля работы газовой турбины расходуется на сжатие газа в компрессоре.

Микрогазовые турбины обладают следующими преимуществами:

- низкий уровень выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду;
- возможность реализации схемы параллельного подключения силовых агрегатов для обеспечения бесперебойного подвода энергии при увеличении электрической нагрузки;
- малое количество движущихся частей.

В то же время МГТ характеризуются низким электрическим КПД (15÷25 % в зависимости от нагрузки) и высокими капитальными затратами. Для



корректного сравнения, расчет *LCOE* был проведен для того же полигона ТКО и близкой по мощности установки. Поскольку при низкой загрузке газотурбинной установки ее электрический КПД значитель-

но снижается, для расчетов были выбраны четыре параллельно подключенных силовых агрегата разной мощности (табл. 5), характеристики которых представлены в табл. 6.

Таблица 5  
Состав комбинированной МГТ  
The composition of the combined MGT

Тип агрегата	Полная загрузка	Всего агрегатов данного типа, шт	Установленная мощность, кВт
МГТ-30	Нет	1	495
МГТ-65	Нет	1	
МГТ-200	Да	2	

На основе данных [15], стоимость обслуживания и самих силовых агрегатов была принята равной 0,01 USD/кВт·ч.

Период эксплуатации силовых агрегатов и полигона составил 30 лет.

Таблица 6  
Технические характеристики микрогазотурбинных установок [16]  
Technical characteristics of microgas turbine plants [16]

Установленная мощность, кВт	495
Срок службы, ч	219 000
Содержание метана в топливе, %	47,5
Потребление топлива МГТ-30, м <sup>3</sup> /час	12
Потребление топлива МГТ-65, м <sup>3</sup> /час	23
Потребление топлива МГТ-200, м <sup>3</sup> /час	65
Суммарное потребление газообразного топлива комбинированной МГТ, м <sup>3</sup> /час	165

При экономических оценках были учтены стоимость системы очистки свалочного газа, затраты на строительство, стоимость силового агрегата, эксплуатационные расходы и плата за выбросы загрязняющих веществ в атмосферу (NO<sub>x</sub>, CO). Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 7  
Стоимость сооружения и обслуживания энергокомплекса при пересчете на паритет покупательной способности РФ на 2017 г. за весь срок эксплуатации установки [14, 17]  
Table 7  
The cost of construction and maintenance of the power complex, in terms of parity of the purchasing power of the Russian Federation for 2017 for the entire service life of the installation [14, 17]

Статья расходов	Расходы, USD
<b>Стоимость оборудования</b>	
Комбинированная МГТ установка мощностью 495 кВт	975 500
Установка сбора биогаза и хранения	462 963
Очистные сооружения для биогаза	38 889
Строительные работы (залвка фундамента под систему сбора биогаза, возведение помещений, монтаж установок)	66 939
<b>Эксплуатационные расходы</b>	
Эксплуатация и обслуживание ГТУ за все время проекта	1 095 000
Эксплуатация и обслуживание системы сбора и хранения биогаза за все время проекта	13 677
<b>Плата за выбросы при эксплуатации ГТУ</b>	
Плата за выбросы NO <sub>x</sub> за все время эксплуатации для России	504,25
Плата за выбросы CO за все время эксплуатации для России	24,674

#### 4. Результаты и их обсуждение

В предположении, что ГПУ будет работать 24 часа в сутки круглый год, приведенная стоимость электроэнергии составила 0,71 (руб./кВт·ч), что более

чем в 5 раз ниже тарифа (3,71 руб./кВт·ч) продажи электроэнергии населению в Волоколамском районе, при этом стоимость установленной мощности – 1 512 USD/кВт. На момент написания материала стоимость доллара составляет 66 руб., тогда в рублевом эквива-

ленте стоимость киловатта установленной мощности составляет почти 100 тыс. руб.

В предположении, что МГТ будет работать 24 часа в сутки круглый год, приведенная стоимость электроэнергии составила 1,8 (руб./кВт·ч), стоимость установленной мощности – 3 100 USD/кВт, что в рублевом эквиваленте составляет около 200 тыс. руб. Такой результат получился за счет того, что стоимость самих МГТ намного выше. Кроме того, газовая турбина требует больше эксплуатационных затрат в силу относительно частой замены камеры сгорания и лопаток турбины [21]. Замена камеры сгорания является трудоемким процессом и не может производиться на месте эксплуатации энергоустановки.

Газотурбинное оборудование стоит выбирать, когда ограничена площадь, которую можно выделить для его размещения. Поскольку работа ГТУ отличается низким уровнем шума, при наличии хорошей звуковой изоляции, то это хорошее решение для районов с высокой плотностью застройки.

На основе полученных результатов был проведен расчет и сравнительный анализ потенциальной энергетической производительности нескольких полигонов при использовании образующегося свалочного газа на газопоршневой установке. В расчетах предполагалось, что в газопоршневой установке большей мощности срабатывается весь объем образующегося свалочного газа (табл. 8).

Таблица 8  
Результаты сравнения энергетического потенциала различных полигонов ТКО [14, 24]  
Table 8  
Comparative characteristics of different landfills [14, 24]

	Полигон «Горноста́й» Владивосток	Полигон «Ядрово» Волоколамск	Полигон «Kamphaeng Saen» Nakhon Pathom, Таиланд
Выход биогаза, м <sup>3</sup> /час	925	1 500	300
Удельный выход биогаза, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> площади полигона	0,011	0,05	0,0015
Энергетический потенциал, МВт·ч за год	224,23	363,63	72,726

Существенная разница в выходе биогаза с полигонов обусловлена тем, что для полигона «Ядрово» предполагалось, что метаногенезу подвергается вся органическая часть захораниваемого ежегодно ТКО, а в случае с полигонами «Горноста́й» и «Kamphaeng Saen» использовались данные о выходе биогаза из установленных скважин, которые могут не охватывать весь объем полигона. Тем не менее полученные результаты дают ощутимый выход электрической энергии и свидетельствуют о значительности энергетических ресурсов полигонов ТКО.

### 5. Заключение

Результаты технико-экономического анализа продемонстрировали преимущества ГПУ в сравнении с МГТ: приведенная стоимость электроэнергии составляет 0,71 руб./кВт·ч на ГПУ и 1,8 руб./кВт·ч на МГТ. Стоимость 1 кВт установленной мощности ГПУ составляет 1 512 USD, а стоимость 1 кВт установленной мощности на МГТ – 3 100 USD.

Расчетный годовой выход биогаза на полигоне «Ядрово» составляет 120 млн м<sup>3</sup>/год, энергетический потенциал такого объема биогаза составляет 363,63 МВт·ч в год. Нарращивание установленной электрической мощности и пропускной способности установки по сбору и хранению биогаза неизбежно приведет к повышению капитальных и эксплуатационных затрат.

Реализация проектов переработки свалочного газа создает нишу для использования отечественных газопоршневых установок с целью импортозамещения, а конкретно – для сегмента газопоршневых ус-

тановок с максимальной электрической мощностью 500 кВт.

### Список литературы

- [1] Власкин, М.С. Воздействие на окружающую среду при обращении с ТКО / М.С. Власкин, А.В. Григоренко // Журнал ТБО. – 2018. – № 9. – С. 2–8.
- [2] Территориальная схема обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами Московской области [Электронный ресурс]: Приложение к постановлению Правительства Московской области от 22.12.2017. №984/47, Красногорск, 2018 г. – С. 14–17. – Режим доступа: <https://rsbor-msk.ru>. – (Дата обращения: 23.03.2019.).
- [3] Zietsman, J. Feasibility of landfill gas as a liquefied natural gas fuel source for refuse trucks / J. Zietsman [et al.]. // Journal of the Air and Waste Management Association. – 2008. – Vol. 58. – No. 5. – P. 613–619 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.5.613>. – (Дата обращения: 19.03.2019).
- [4] Почему Московская область задыхается [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vedomosti.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 23.03.2019).
- [5] Нохов, Л.Г. Энергия из отходов как источник возобновляемой энергии – возможности в России / Л.Г. Нохов // Доклад на III Российском Международном энергетическом форуме 19–22 мая 2015 г.
- [6] Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Waste Treatment Processes for Energy Generation. 2019, Elsevier. – P. 93–117.

[7] Разложение ТБО в местах захоронения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ztbo.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 23.03.2019).

[8] Вайсман, Я.И. Управление отходами. Сточные воды и биогаз полигонов захоронения твердых бытовых отходов / Я.И. Вайсман [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 258 с.

[9] Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронений твердых бытовых отходов. – Москва, 2003. – 19 с.

[10] Методические указания по расчету выбросов парниковых газов в атмосферу от полигонов твердых бытовых отходов. – Алматы, 2010. – 10 с.

[11] Мусорный полигон «Ядрово» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 23.03.2019).

[12] Аналитическая записка. Энергетический потенциал свалочного газа на полигонах ТБО [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fecsrfec.ru/upload/iblock/488/488126c7a984fc266ebb2400c8257acb.pdf>. – (Дата обращения: 17.03.2019).

[13] Электронная библиотека. Список полигонов ТБО в Москве и Московской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_полигонов\\_ТБО\\_в\\_Москве\\_и\\_Московской\\_области](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_полигонов_ТБО_в_Москве_и_Московской_области). – (Дата обращения 16.03.2019).

[14] Pawananont, K. Feasibility analysis of power generation from landfill gas by using internal combustion engine, organic Rankine cycle and Stirling engine of pilot experiments in Thailand / Pawanarot K., Leephakpreeda T. // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 128. – P. 575–579.

[15] О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах: постановление Правительства РФ от 13.09.2016. – № 913.

[16] Basrawi, F. Unit sizing of biogas-fuelled Micro Gas Turbine cogeneration systems in a sewage treatment plant / Basrawi F., Ibrahim H., Yamada T. // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 75. – P. 1052–1058.

[17] Микротурбины Capstone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://powerquality.ru/oborudovanie/mikroturbiny/mikroturbiny-capstone/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 18.03.2019).

[18] Цены на микротурбины Capstone без иллюзий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteoenergetic.ru/ceny-na-mikroturbiny-capstone/>. – Заглавие с экрана – (Дата обращения: 12.03.2019).

[19] Breeze, P. Chapter 5 – Piston Engine – Based Power Plants / P. Breeze. – *Power Generation Technologies (Third Edition)*. – 2019. – P. 99–119

[20] Buffi, M. Combustion of fast pyrolysis bio-oil and blends in a micro gas turbine / M. Buffi [et al.] // *Biomass and Bioenergy*. – 2018. – Vol. 115. – P. 174–185.

[21] Мишланова, М.Ю. Интегральный эффект внедрения альтернативного энергоносителя – биогаза / М.Ю. Мишланова. – 2007. – С. 125.

[22] Техобслуживание газопоршневой электростанции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteoenergetic.ru/tehnicheskoe-obsluzhivanie-gazoporshnevoj-elektrostancii/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 14.03.2019).

[23] Мутугуллина, И.А. Сравнительный анализ газопоршневой и газотурбинной установок в контексте решения проблем энергосбережения / И.А. Мутугуллина // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2014. – № 23. – С. 375.

[24] Неприглядная сторона Владивостока: как и где утилизируется городской мусор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://smitmitti.livejournal.com/119157.html>. – (Дата обращения: 27.03.2019).

## References

[1] Vlaskin M.S., Grigorenko A.V. Environmental impacts during MSW management (Vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu pri obrashchenii s TKO). *Zhurnal TBO*, 2018;9:2–8 (in Russ.).

[2] The territorial scheme of waste management, including MSW in the Moscow region. Appendix to the Decree of the Government of the Moscow Region of 12.22.2017. (Territorial'naya skhema obrashcheniya s otkhodami, v tom chisle s tverdymi kommunal'nymi otkhodami Moskovskoi oblasti [E-resource]: Prilozhenie k postanovleniyu Pravitel'stva Moskovskoi oblasti ot 22.12. 2017. #984/47), Krasnogorsk, 2018; pp. 1417). Available on: <https://rsbor-msk.ru> (03.23.2019.) (in Russ.).

[3] Zietsman J., Bari M.E., Rand A.J., Gokhale B., Lord D., Kumar S. Feasibility of landfill gas as a liquefied natural gas fuel source for refuse trucks. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 2008; 58(5):613–619; <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.5.613>. (03.19.2019) (in Eng.).

[4] Why Moscow Region is suffocating (Pochemu Moskovskaya oblast' zadykhaetsya) [E-resource]. Available on: <https://www.vedomosti.ru>. (03.23.2019) (in Russ.).

[5] Nokhov L.G. MSW energy as a source of renewable energy – opportunities in Russia: report at the III Russian International Energy Forum (Energiya iz otkhodov kak istochnik vozobnovlyaemoi energii – vozmozhnosti v Rossii: Doklad na III Rossiiskom Mezhdunarodnom energeticheskom forume), 19–22 May 2015 (in Russ.).

[6] Kumar S., Pandey A. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. Waste Treatment Processes for Energy Generation. 2019; pp. 93–117 (in Eng.).

[7] MSW decomposition at burial sites (Razlozhenie TBO v mestakh zakhoroneniya) [E-resource]. Available on: <https://ztbo.ru>. (03.23.2019) (in Russ.).



[8] Vaisman Ya.I., Korotaev V.N., Petrov V.U., Zomarev A.M. Waste management. Sewage and biogas of solid waste landfills (Upravlenie otkhodami. Stochnye vody i biogaz poligonov zakhroneniya tverdykh bytovykh otkhodov). Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekh. un-ta, 2012; p. 258 (in Russ.).

[9] Recommendations on the calculation of biogas generation and the selection of degassing systems at solid waste landfills (Rekomendatsii po raschetu obrazovaniya biogaza i vyboru sistem degazatsii na poligonakh-zakhronenii tverdykh bytovykh otkhodov). Moscow, 2003; p. 19 (in Russ.).

[10] Guidelines for the calculation of greenhouse gas emissions into the atmosphere from solid waste landfills (Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov parnikovykh gazov v atmosferu ot poligonov tverdykh bytovykh otkhodov). Almaty, 2010; p. 10 (in Russ.).

[11] Yadrovo landfill (Musornyi poligon "Yadrovo") [E-resource]. Available on: <https://tass.ru> (03.23.2019) (in Russ.).

[12] Analytic note. Energy potential of landfill gas at solid waste landfills (Analiticheskaya zapiska. Energeticheskii potentsial svalochnogo gaza na poligonakh TBO) [E-resource]. Available on: <http://fecsrfec.ru/upload/iblock/488/488126c7a984fc266ebb2400c8257acb.pdf> (03.17.2019.) (in Russ.).

[13] E-library. List of MSW landfills in Moscow and the Moscow region (Elektronnaya biblioteka. Spisok poligonov TBO v Moskve i Moskovskoi oblasti) [E-resource]. – Available on: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Spisok\\_poligonov\\_TBO\\_v\\_Moskve\\_i\\_Moskovskoi\\_oblasti](https://ru.wikipedia.org/wiki/Spisok_poligonov_TBO_v_Moskve_i_Moskovskoi_oblasti). (03.16.2019.) (in Russ.).

[14] Pawananont K., Leephakpreeda T. Feasibility analysis of power generation from landfill gas by using internal combustion engine, organic Rankine cycle and Stirling engine of pilot experiments in Thailand. *Energy Procedia*, 2017;(128):575–579 (in Eng.).

[15] On rates of fees for negative impact on the environment and additional ratios: Decree of the Government of the Russian Federation of September 13, 2016 No. 913 (O stavkakh platy za negativnoe vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu i dopolnitel'nykh koeffitsien-

takh: postanovlenie Pravitel'stva RF ot 13.09.2016 # 913) (in Russ.).

[16] Basrawi F., Ibrahim H., Yamada T. Unit sizing of biogas-fuelled Micro Gas Turbine cogeneration systems in a sewage treatment plant. *Energy Procedia*, 2015;75:1052–1058 (in Eng.).

[17] Microturbines Capstone (Mikroturbiny Capstone) [E-resource]. Available on: <https://powerquality.ru/oborudovanie/mikroturbiny/mikroturbiny-capstone/>. (03.18.2019) (in Russ.).

[18] Capstone microturbine prices without illusions (Tseny na mikroturbiny Capstone bez illyuzii) [E-resource]. Available on: <http://meteoenergetic.ru/ceny-na-mikroturbiny-capstone/> (03.12.2019) (in Russ.).

[19] Breeze P. Chapter 5 – Piston Engine – Based Power Plants. *Power Generation Technologies* (Third Edition), 2019; pp. 99–119 (in Eng.).

[20] Buffi M. Combustion of fast pyrolysis bio – oil and blends in a micro gas turbine. *Biomass and Bioenergy*, 2018;115:174–185 (in Eng.).

[21] Mishlanova M.Yu. Integral effect of introducing an alternative energy carrier – biogas (Integral'nyi effekt vnedreniya al'ternativnogo energonosatelya – biogaza), 2007; p. 125 (in Russ.).

[22] Maintenance of a gas piston power plant (Tekhobsluzhivanie gazoporshnevoi elektrostantsii) [E-resource]. Available on: <http://meteoenergetic.ru/tehnicheskoe-obsluzhivanie-gazoporshnevoj-elektrostantsii/>. (03.14.2019) (in Russ.).

[23] Mutugullina I.A. Comparative analysis of gas piston and gas turbine units in the context of solving energy conservation problems (Sravnitel'nyi analiz gazoporshnevoi i gazoturbinnoi ustanovok v kontekste resheniya problem energosberezheniya). *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014;23:375 (in Russ.).

[24] The ugly side of Vladivostok: how and where city waste is disposed (Nepriglyadnaya storona Vladivostoka: kak i gde utiliziruetsya gorodskoi musor) [E-resource]. Available on: <https://smitsmitty.livejournal.com/119157.html>. (03.27.2019) (in Russ.).

Транслитерация по BSI

