

ICES-2018
BELGOROD

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Белгородский государственный
технологический университет
им. В. Г. Шухова»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

III Международная
научно–техническая
конференция

Сборник трудов

(Белгород, 29–30 ноября 2018 г.)

Белгород
2018

Министерство образования и науки Российской Федерации
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Департамент жилищно-коммунального хозяйства Белгородской области
Совет молодых ученых и специалистов Белгородской области
при Губернаторе Белгородской области
Филиал ПАО «МРСК-Центр» – «Белгородэнерго»
Белгородский институт альтернативной энергетики
Донецкий национальный технический университет (г. Донецк)
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (г. Макеевка)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

III Международная
научно-техническая
конференция

Сборник трудов

(г. Белгород, 29–30 ноября 2018 г.)

Белгород
2018

УДК 620.9(082)

ББК 3

Э65

Энергетические системы: III Междунар. науч.-техн. конф.: сб. трудов, Белгород, 29-30 нояб. 2018 г. / Белгор. гос. технол. ун-т; отв. ред. П.А. Трубаев. – Белгород, 2018. – 340 с.

ISBN 978-5-361-00663-2

В сборнике представлены работы, освещающие современное состояние теоретических и экспериментальных исследований по следующим направлениям: теплоэнергетика и теплотехника; электроэнергетика и электротехника; энергосбережение и энергоэффективность, экология энергетики; альтернативные и возобновляемые источники энергии; энерго- и ресурсосбережение в технологиях. В сборнике также представлены работы, подготовленные студентами, магистрантами и аспирантами, размещенные в секции молодых ученых.

Сборник предназначен для широкого круга научных и инженерных работников, а также аспирантов, магистрантов и студентов высших учебных заведений.

Статьи прошли процедуру рецензирования и публикуется в авторской редакции, авторы публикаций сохраняют исключительные права на размещенные в сборнике материалы.

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 18-08-20138.

УДК 620.9(082)

ББК 3

ISBN 978-5-361-00663-2

© Белгородский государственный
технологический университет
(БГТУ) им. В.Г. Шухова, 2018

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ПРИ СЖИГАНИИ БРИКЕТИРОВАННЫХ RDF-ТОПЛИВ

ст. преп. **Корнилова Н.В.**

д-р техн. наук, доц. **Трубаев П.А.**

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород*

***Аннотация.** Из обзора существующего положения сделан вывод, что сжигание твердых коммунальных отходов является эффективным способом утилизации, но в настоящее время промышленные технологии для сжигания отходов разработаны только для мощности свыше 100 тыс. т отходов в год. Целью работы являлось исследование сжигания в пирролизном водогрейном котле малой мощности брикетов по сравнению с цельнокусковой древесиной и исследование сжигания в водогрейном котле малой мощности со слоевой топкой брикетов различного состава. Установлено, что процесс горения в котлах малой мощности характеризуется низким тепловым к.п.д. (50...74%). Характеристики процесса горения RDF-топлива сопоставимы с характеристиками сжигания древесины и древесных брикетов. Сжигание топливных брикетов характеризовалось большей эффективностью, чем сжигание цельнокусковой древесины. Сделан вывод о целесообразности сжигания отходов в установках малой производительности, но для обеспечения полного сгорания и необходимых температур процессы горения и отбор теплоты необходимо конструктивно разделить.*

Статья подготовлена в рамках Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

1. ВВЕДЕНИЕ

Организация утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО) является одной из сложных технических проблем, которая включает материально-техническое обеспечение, вопросы экологии, энергетические и экономические аспекты [1]. В работе [2] отмечается, что утилизация ТКО не является чисто экономическим инвестиционным проектом, а является необходимым условием существования общества, от которой нельзя отказаться.

Полигон является основным методом утилизации ТКО в большинстве стран [3]. Экологические требования, в частности возмож-

ность загрязнения подземных вод, и утилизация выделяющегося свалочного газа приводит к увеличению стоимости захоронения [4]. Один из эффективных способов утилизации отходов является термическая переработка с выработкой энергии [4, 5], которое при получении тепловой энергии также позволяет снизить затраты на утилизацию отходов [6]. Дополнительным преимуществом рекуперации энергии из отходов путем сжигания является то, что для получения энергии могут быть использованы ТКО с широким диапазоном качества [7].

В работе [8] показано, что с экономической точки зрения в большинстве случаев тепловая обработка наиболее эффективна по сравнению с другими способами утилизации ТКО. Сравнение «жизненного цикла» отходов, включающее экономические и экологические аспекты, проведенное в работе [8] показало, что биологические способы переработки предпочтительны с экологической точки зрения, в то время как сжигание и газификация – с экономической.

В ряде работ [4, 9] предложены критерии, которые позволяют провести первоначальную оценку таких проектов. Решения для комбинированного производства электроэнергии и теплоты является эффективным в том случае, когда имеется крупный потребитель тепловой энергии [10]. В работе [11] произведен анализ сжигания RDF-топлива (альтернативного топлива, полученного измельчением и сушкой сортированных ТКО) на электростанции на основании второго закона термодинамики и сделан вывод, что эффективность системы в целом очень низкая и основные качественные потери энергии происходят при парогенерации. Такие же выводы сделаны в работе [12], где выполнен энергетический анализ парового котла, сжигающего отходы. Наивысший к.п.д. установок для сжигания отходов составляет не более 65-70% [6].

Использование альтернативного топлива по воздействию на окружающую среду сопоставимо с традиционными энергетическими установками на органическом топливе [5]. Но в настоящее время технологии сжигания разработаны для крупномасштабного производства с обработкой отходов массой более 100 тыс. т в год [13, 14]. Эффективность сжигания отходов небольших городов рассмотрена в ряде работ. В работе [15] на основе анализа городов с населением 100, 500 тыс. и 1 млн. человек показана увеличение эффективности выработки электроэнергии из отходов вместо из захоронения на полигоне при увеличении размера населенного пункта. В работе для среднего района [16] проанализированы показатели промышленных технологий сжи-

гания и газификации и сделан вывод, что наилучшие экономические показатели характерны для использования несортированных отходов.

Из обзора существующего положения можно сделать вывод, что сжигание является эффективным способом утилизации отходов при условии соблюдения теплотехнических и экологических требований. Но в настоящее время промышленные технологии для сжигания ТКО разработаны только для мощности свыше 100 тыс. т отходов в год (10 т/час).

Целью работ являлось: 1) исследование сжигания в пиролизном водогрейном котле малой мощности брикетов по сравнению с цельнокусковой древесиной, на которую рассчитана конструкция котла; 2) исследование сжигания в водогрейном котле малой мощности со слоевой топкой брикетов различного состава.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установки и приборная база для исследования

В работе исследовались две установки, в которых производилось сжигания отходов:

1. Пиролизный водогрейный котел мощностью 100 кВт.

Котел представляет цельносварную конструкцию из стали, которая состоит из двух камер сгорания. Нижняя камера – камера газификации, в которой при ограниченном поступлении кислорода и высокой температуре топливо разлагается на твёрдую фракцию и летучую часть. Верхняя камера предназначена для дожигания выделившегося газа.

2. Водогрейный котел со слоевой топкой мощностью 200 кВт.

Котёл представляет цельносварную конструкцию. Топливо сжигается на колосниковой решетке, поддув воздуха может быть как естественный, так и дутьевым вентилятором. Стены котла теплоизолированы минеральной ватой Izovol СТ-40.

Котлы установлены на производственной площадке, расположенной в городе Белгороде (Россия) и предназначены для выработки горячей воды на нужды отопления двух административных зданий площадью 600 и 1900 м². Тепловая нагрузка по тепловому расчету здания составляет 32 и 86 кВт соответственно и превышает нормативную примерно в 2 раза (нормативные тепловые нагрузки для указанных зданий составляют 13 и 41 кВт).

При проведении испытаний использовались:

– газоанализатор Testo 330-1 LL (измерение температуры отходящих газов и содержания в них O₂ и CO);

– газанализатор ГАНК-4 (измерение массовой концентрации вредных веществ NO₂, NO, CO, CH₄, фенол, бензол, SO₂, формальдегиды, HCl, NH₃, R-SH, H₂S);

– ультразвуковой расходомер «PanametricsPT878» (измерение объемного расхода теплоносителя в трубах);

– инфракрасный пирометр Testo-845 (измерение температуры в топке, температуры поверхности труб).

Описание сжигаемых образцов

При проведении замеров использовались как цельно кусковые элементы древесины и шпал, так и цилиндрические брикеты, представляющие собой цилиндры диаметром 50 мм, длиной 100-200 мм, плотностью 800 кг/м³, получаемые прессованием измельчённой и дроблёной древесины. В ходе испытаний проводилось сжигание материалов, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика сжигаемых отходов

| № топлива (табл.) | Состав | Форма |
|----------------------------|--|----------------------------------|
| Пиролизный котел | | |
| 2-а | Железнодорожные шпалы | Крупные неизмельченные фрагменты |
| 2-б | Древесина (сосна) | |
| 2-в | Отходы древесины (окна, двери, мебель) | |
| 2-г | Древесные гранулы | Цилиндрические брикеты |
| 3 | RDF-топливо (сортированные твёрдые бытовые отходы) | |
| 5 | Смесь древесных гранул (50%) и RDF-топлива (50%) | |
| Котел со слоевым сжиганием | | |
| 6 | Древесина 70%, пластик 30% | Цилиндрические брикеты |
| 7 | Древесина 50%, пластик 50% | |

Для образцов 6 и 7 была измерена влажность методом высушивания навески в муфельной печи. Массовая влажность составила:

образец № 6 13,6%;

образец № 7 13,5%.

Методика испытаний котлов

Методика проведения испытаний включала:

1. Загрузка топлива и вывод котла на номинальный режим.

2. Измерение температуры воды в прямом и обратном трубопроводе и расхода воды в обратном трубопроводе с использованием ультразвукового расходомера Panametrics RT878 и пирометра/контактного термометра Testo-845 (интервал 3 мин).

3. Измерение температуры и состава уходящих газов (O_2 , CO) с использованием газоанализатора «Testo 330-1 LL» (интервал 1 мин).

4. Измерение выбросов в газоходе после котла с использованием переносного газоанализатора ГАНК-4.

5. Измерение температуры горения топлива в топке с использованием пирометра Testo-845 (интервал 15-20 мин).

В результате проведенных испытаний по измеренным данным рассчитывалось количество выработанной тепловой энергии, тепловые потери и к.п.д. котельного агрегата (методом обратного баланса по упрощённой методике теплотехнических расчетов).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Оценка эффективности сжигания отходов в пиролизном котле

При сжигании дров установлено, что процесс горения в котле стабильный и нарушается только при закладке дров (рис. 1). Закрытие шибера не приводит к нарушению режима горения (повышению содержания CO или O_2), но при этом заметно снижается температура отходящих газов за котлом. К.п.д. котла в устойчивом режиме работы составляет 64-74%, что ниже паспортных значений.

При сжигании брикетов проведены две серии испытаний, в одной из них оценивалась работа котла при закрытой дверце подачи воздуха, во втором – также при частично перекрытом окне подачи воздуха. Результаты испытания представлены на рис. 2. Загрузка брикетов осуществлялась в 13:42; 13:58 и 15:13.

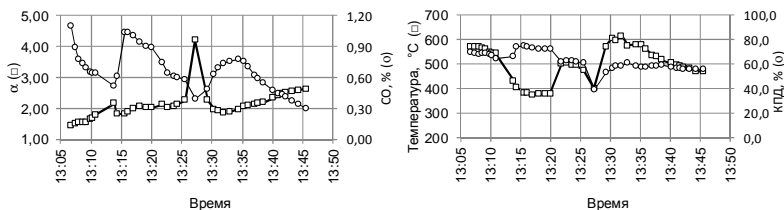


Рис. 1. Результаты измерений при сжигании древесины (топливо 2б), 03.12.2013 г.

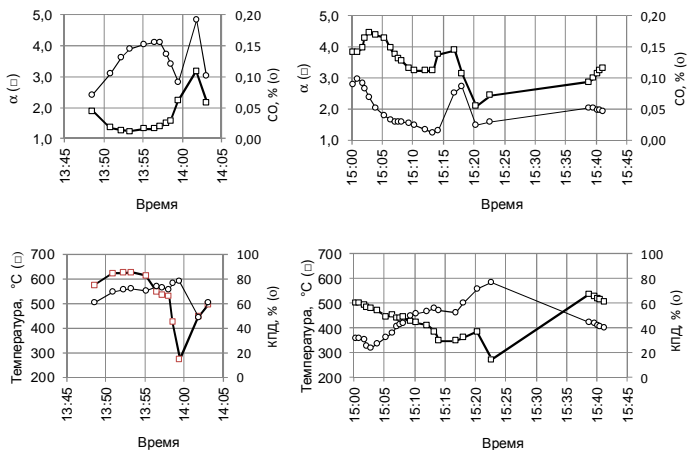


Рис. 2. Результаты измерений при сжигании древесных брикетов (топливо 2г), 04.12.2013 г.

Оценка тепловой мощности котла

Так как котел работает в нестационарном режиме, то мощность котла меняется во времени.

Для определения мощности использовались данные замеров расхода теплоносителя V , м³/с, нагреваемого в котле (измерения производились ультразвуковым накладным расходомером) и температуры прямой $t_{пр}$ и обратной $t_{об}$ воды, °С, определяемой по стационарным датчикам температур, вмонтированным в трубопроводы прямой и обратной воды.

Теплопроизводительность котла

$$Q = 4,186(t_{пр} - t_{об})V\rho, \text{ кВт},$$

где $t_{пр}$, $t_{об}$ – температура прямой и обратной воды, °С; V – объемный расход воды, м³/с; ρ – плотность воды, кг/м³.

Тепловыделение сжигаемого топлива:

$$Q_T = Q / \eta,$$

где η – к.п.д. котла, определенный по результатам газового анализа и по методике упрощенных теплотехнических расчетов, модифицированных для условий сжигания отходов.

Выводы по теплотехническим испытаниям котла при сжигании древесины и брикетов (топливо 2б и 2г):

1. Процесс горения в котле стабильный и нарушается только при закладке топлива.

2. Средняя часовая мощность котла при сжигании древесных брикетов составляет 95,6 кВт, что на 5,6% больше средней часовой мощности котла при сжигании дров.

3. Коэффициент полезного действия котла составляет не более 74%, средний к.п.д. при работе в устойчивом режиме – 60-74%, что меньше паспортных значений (84%). Топливо в котле сгорает полностью, о чем свидетельствует низкое содержание CO в отходящих газах.

Оценка эффективности сжигания брикетированных отходов в котле с колосниковой решеткой

В табл. 1 представлены усреднённые данные результатов измерений.

Таблица 2

Средние значения параметров для каждого режима сжигания топлива

| Время замеров | Вид топлива | Температура отходящих газов $t_{ог}$, °C | Содержание CO, ппм | Коэффициент избытка воздуха α |
|----------------------|-----------------|---|--------------------|--------------------------------------|
| 22.03.16 10:48-11:56 | RDF-топливо № 6 | 263 | 917 | 5,7 |
| 29.03.16 12:48-12:57 | | 322 | 1012 | 4,3 |
| 29.03.16 13:03-13:13 | | 291 | 1390 | 4,9 |
| 29.03.16 13:42-13:52 | | 270 | 1823 | 5,4 |
| 29.03.16 14:53-15:03 | RDF-топливо № 7 | 260 | 1668 | 4,9 |
| 29.03.16 15:31-15:43 | | 279 | 1438 | 3,7 |
| 04.04.16 12:25-12:33 | | 212 | 1832 | 10,6 |
| 04.04.16 12:37-12:47 | | 235 | 1961 | 9,3 |
| 04.04.16 12:01-12:11 | | 277 | 1305 | 5,1 |
| 04.04.16 11:41-11:51 | | 283 | 1170 | 4,8 |

На рис. 3 представлены изменение параметров работы котла в процессе испытаний.

Анализ зависимостей между параметрами (рис. 4) показал, что зависимость имеется между температурой отходящих газов $t_{ог}$ и коэффициентом избытка воздуха α , коэффициент корреляции -0,75. Между температурой отходящих газов $t_{ог}$ и содержанием CO (коэффициент корреляции -0,39) и между содержанием CO и коэффициентом избытка воздуха α (коэффициент корреляции 0,29) зависимости нет. Это свидетельствует о том, что время горения недостаточно и отбор теплоты от газов снижает эффективность сжигания отходов.

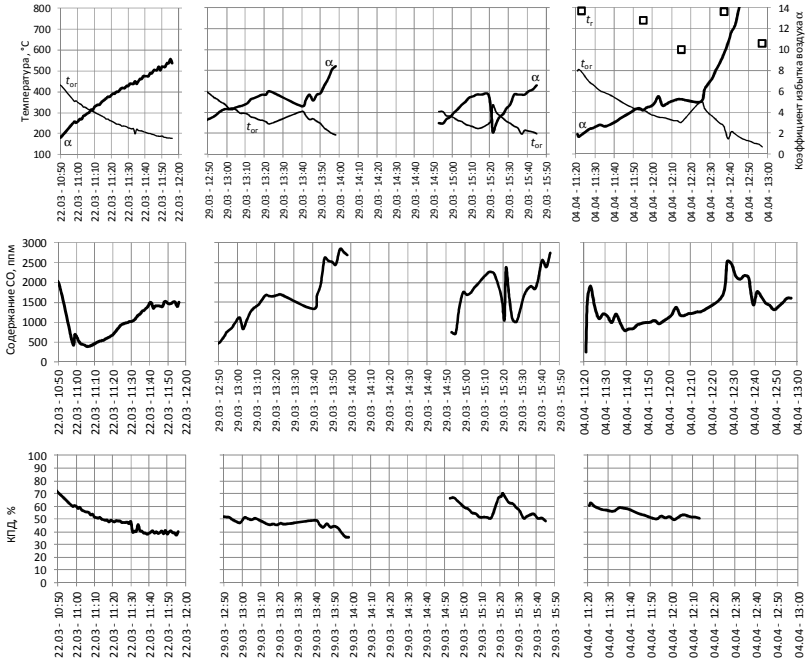


Рис. 3. Результаты замеров температуры отходящих газов $t_{ог}$, температуры горения $t_{г}$, коэффициента избытка воздуха α , содержания CO и тепловой к.п.д.

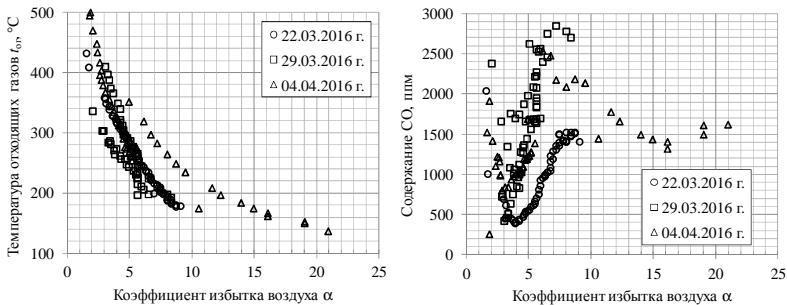


Рис. 4. Зависимость между параметрами горения

Температура горения, замеры которой производились в третий день испытаний, составляла 600...785°C, что ниже требований Директивы Европейского Парламента и Совета 2000/76/ЕС «О сжигании отходов», согласно которым экологическим требованиям удовлетворяют установки, в которых продукты горения находятся не менее 2 с при температуре не менее 850°C. Низкая температура горения была обусловлена высоким коэффициентом избытка воздуха и при оптимизации процесса горения экологические требования будут соблюдены.

Выводы по сжиганию RDF-брикетов на слоевой решетке

1. Процесс горения в котле стабильный и имеет прямую зависимость от времени выгорания топлива.

2. Средняя часовая мощность котла при сжигании древесных брикетов составляет 50...110 кВт, что сопоставимо с параметрами при сжигании дров и древесных брикетов.

3. Коэффициент полезного действия котла составляет не более 70%, средний к.п.д. при работе в устойчивом режиме – 50-60%, что меньше паспортных значений (84%). Высокое содержание CO, до 0,2%, в отходящих газах при высоких значениях коэффициента избытка воздуха свидетельствует о недостаточном времени горения.

4. ВЫВОДЫ

Процесс горения в котлах малой мощности характеризуется низким тепловым к.п.д., значение которого изменялось в пределах 60...74% для пиролизного котла и 50...70% при сжигании RDF-брикетов. Характеристики процесса горения RDF-топлива сопоставимы с характеристиками сжигания древесины и древесных брикетов. Процесс горения характеризовался стабильностью и теплотехнические параметры установок прямо зависели от степени выгорания топлива. Сжигание топливных брикетов характеризовалось большей эффективностью, чем сжигание цельнокусковой древесины.

В процессе испытаний проводилась оценка содержания опасных соединений в отходящих газах (результаты в данной работе не приведены), которое показало, что для всех видов исследуемых сжигаемых материалов расчётная приземная концентрация вредных веществ не превышают предельно допустимые концентрации, и в большинстве случаев значительно ниже их.

Можно сделать вывод о целесообразности сжигания отходов в установках малой производительности, но для обеспечения полного сгорания и необходимых температур процессы горения и отбор теплоты необходимо конструктивно разделить.

Библиографический список

1. Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities / J. Galvarino, C. Balcazar, R. A. Dias, J. A. P. Balestieri // *Energy*. 2013. No 55. P. 728–741.
2. **Miranda M. L., Hale B.** Waste not, want not: the private and social costs of waste-to-energy production // *Energy Policy*. 1997. No 25(6). P. 587–600.
3. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe / J. Malinauskaite, H. Jouharab, D. Czajczynska et al // *Energy*. 2017. No 141. P. 2013–2044.
4. **Туров А.Н.** Перспективы энергетической утилизации ТБО // *Энергосвет*, 2014. № 4 (35). С. 31–35.
5. Waste to energy – An evaluation of the environmental impact / M. Pavlas, M. Touš, L. Bébar, P. Stehlik // *Applied Thermal Engineering*. 2010. No 30 (16). P. 2326–2332.
6. **Morcós V. H.** Energy recovery from municipal solid waste incineration – A review // *Heat Recovery Systems and CHP*. 1989. No 9 (2). P. 115–126.
7. Solid recovered fuel: An experiment on classification and potential applications // C. Bessi, L. Lombardi, R. Meoni // *Waste Management*. 2016. No 47 (B). P. 184–194.
8. **Panepinto D., Blengini G. A., Genon G.** Economic and environmental comparison between two scenarios of waste management: MBT vs thermal treatment // *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. No 97. P. 16–23.
9. An industrial ecology approach to municipal solid waste management: I. Methodology / R. L. Smith, D. Sengupta, S. Takkellapati, C. C. Lee // *Resources, Conservation and Recycling*. 2015. No 104 (A). P. 311–316.
10. Caputo A.C., Palumbo M., Scacchia F. Perspectives of RDF use in decentralized areas: comparing power and co-generation solutions // *Applied Thermal Engineering*. 2004. No 24(14–15). P. 2171–2187.
11. **Shapiro H.N., Kuehn T.H.** Second law analysis of the Ames solid waste recovery system // *Energy*. 1980. No 5(8–9). P. 985–991.
12. Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods / C. Li, C. Gillum, K. Toupin, B. Donaldson // *Energy Conversion and Management*. 2015. No 103. P. 665–673.
13. Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities / J.M. Fernández-González, A.L. Grindlay, F. Serrano-Bernardo // *Waste Management*. 2017. No 67. P. 360–374.
14. **Левин Б. И.** Использование твердых бытовых отходов в системах энергоснабжения. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
15. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil / M.M.V. Leme, M.H. Rocha, E.E.S. Lora et al // *Resources, Conservation and Recycling*. 2014. No 87. P. 8–20.
16. **Giugliano M., Grosso M., Rigamonti L.** Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district // *Waste Management*. 2008. No 28(1). P. 39–50.