

DOI: 10.18721/JEST.240303  
УДК 621.9

*Е.Л. Шабуров<sup>1</sup>, А.В. Федюхин<sup>2</sup>, В.А. Ипполитов<sup>2</sup>*

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

2 – Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

## **РАСЧЕТ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

В работе на основании действующих нормативных документов выполнена оценка экологической карты Ленинградской области. Установлено, что доля обработанных и утилизированных отходов не превышает 5–10 % от общего количества материалов, что свидетельствует о низкой степени переработки твердых бытовых отходов (ТБО). Показано, что использование ТБО как топлива для выработки тепловой и электрической энергии экономит традиционные виды топлива (уголь, газ, мазут) и способствует снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. Наиболее перспективным методом термической утилизации является газификация отходов. Выполнено моделирование в среде Aspen Plus установки газификации. Суммарный КПД такой установки по выработке тепловой и электрической энергии составляет 70,5 %.

*Ключевые слова:* твердые бытовые отходы, переработка отходов, газификация, выработка тепловой и электрической энергии, Aspen Plus.

*Ссылка при цитировании:*

Е.Л. Шабуров, А.В. Федюхин, В.А. Ипполитов. Расчет режимных параметров установки газификации ТБО // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 3. С. 38–44. DOI: 10.18721/JEST.240303.

*E.L. Shaburov<sup>1</sup>, A.V. Fedyukhin<sup>2</sup>, V.A. Ippolitov<sup>2</sup>*

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – National research university «Moscow power engineering institute», Moscow, Russia

## **CALCULATION OF OPERATING MODES FOR MUNICIPAL SOLID WASTE GASIFICATION UNIT**

In this study we have assessed the ecological map of the Leningrad Oblast' and reviewed the existing normative documents. It is shown, that the ratio of processed wastes does not exceed 5–10 % of the total material amount, which is a low degree of municipal solid waste (MSW) recycling. We have established that using MSW as a fuel for thermal and electrical energy production helps save traditional fuel types, as well as reduces greenhouse gas emission. We have found that waste gasification is the most perspective method for thermal utilization. Aspens Plus software was used to perform gasification unit parameter modeling. The total efficiency of thermal and electrical energy production was 70,5 %.

*Keywords:* gasification, municipal solid waste, waste processing, production of thermal and electrical energy, Aspen Plus.

*Citation:*

E.L. Shaburov, A.V. Fedyukhin, V.A. Ippolitov, Calculation of operating modes for MSW gasification unit, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(03)(2018) 38–44, DOI: 10.18721/JEST.240303.



## Введение

Ежегодно количество накапливаемых отходов производственного и бытового сектора растет, в то время как эффективные способы их переработки еще не нашли повсеместного применения. Всего же в стране каждый год образуется около 7 млрд т твердых бытовых отходов (ТБО), однако вторичной переработке подвергается лишь небольшая часть. Основную долю отходов подвергают захоронению, выбрасывают на несанкционированные свалки или сжигают, хотя они содержат значительное количество вторичных энергетических ресурсов, которые можно как эффективно перерабатывать, так и повторно использовать в народном хозяйстве. На территории РФ накоплено около 80–100 млрд тонн только твердых отходов (бытовые отходы, изношенные шины, шлаки металлургических производств, отходы обогатительных фабрик и др.). Существующий уровень переработки отходов в России очень низкий, к примеру: переработка ТБО составляет 5–10 %, изношенных шин – 5–7 %, металлолома – 20–30 %, строительных отходов – 10–35 %. Все непереработанные отходы отправляются на многочисленные свалки и полигоны страны. Только для захоронения ТБО ежегодно отчуждается около сотни гектаров земель, пригодных для проживания людей и ведения сельского хозяйства [1–5].

**Цель данной работы** – на примере Ленинградской области проанализировать энергетическую эффективность использования твердых бытовых отходов для выработки тепловой и электрической энергии.

## Расчетное исследование

**Оценка экологической карты Ленинградской области.** В Российской Федерации разрабатываются территориальные схемы обращения с различными отходами, в том числе с

твердыми коммунальными. В Ленинградской области с 2016 года действует приказ № 7 управления Ленинградской области по организации и контролю деятельности по обращению с отходами. На данный момент для Ленинградской области целевые показатели по обезвреживанию, утилизации и размещению отходов не закреплены на законодательном уровне. Согласно приложениям 3 и 10 к Приказу от 17 ноября 2016 года ежегодно в Санкт-Петербурге образуется 1070 тыс. т отходов, в то время как в остальной части Ленинградской области эти цифры составляют 495 тыс. т.

В приложении 12 этого же приказа показан баланс количественных характеристик образования, обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов. В табл. 1 и 2 представлены эти величины.

Согласно данным табл. 1 и 2 доля обработанных и утилизированных отходов не превышает 5–10 % от общего количества материала, что свидетельствует о низкой степени переработки ТБО. По этой причине поиск решений по эффективной утилизации отходов является одной из ключевых экологических задач в Ленинградской области.

**Выбор приоритетного способа переработки ТБО.** Существует большое количество методов по переработке отходов; зачастую их делят на две основные группы: нетермические и термические. К нетермическим методам относят захоронение, компостирование и вторичную переработку отходов. Под термическими методами понимается высокотемпературное воздействие на ТБО (горение, пиролиз, газификация), при этом всегда жидкая фаза – физическая вода – испаряется, а твердая фаза – неорганическая субстанция – претерпевает структурные превращения: дегидратацию, диссоциацию, полиморфизацию, плавление, испарение.

Таблица 1

**Баланс количественных характеристик образования, обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов**

Table 1

**Balance of quantitative characteristics of formation, processing, utilization, detoxication and disposing of municipal solid wastes**

Виды отходов	Количество образовавшихся отходов, т/год	Количество обработанных отходов, т/год	Количество утилизированных отходов, т/год	Количество обезвреженных отходов, т/год	Количество размещенных отходов, т/год
Отходы из жилищ несортированные (исключая крупногабаритные)	391064,329	71246,155	7124,616	0,000	383939,714
Отходы из жилищ крупногабаритные	28456,314	5531,356	553,136	0,000	27903,178
Мусор от офисных и бытовых помещений организаций несортированный (исключая крупногабаритный)	26585,151	4810,234	481,023	259,735	25844,393
Смет и прочие отходы от уборки территории предприятий, организаций	19781,896	1318,148	9282,316	0,000	10499,580
Прочие ТБО	29514,512	2114,277	326,250	1,795	29186,467
<b>ВСЕГО</b>	<b>495402,201</b>	<b>85020,170</b>	<b>17441,091</b>	<b>261,530</b>	<b>477699,580/ 1547699,580*</b>

Таблица 2

**Баланс количественных характеристик образования, обработки, утилизации, обезвреживания, размещения твердых коммунальных отходов и подобных им отходов по классам опасности**

Table 2

**Balance of quantitative characteristics of formation, processing, utilization, detoxication and disposing of municipal solid wastes and analogues according to hazard class**

Виды отходов	Класс опасности	Количество образовавшихся отходов, т/год	Количество обработанных отходов, т/год	Количество утилизированных отходов, т/год	Количество обезвреженных отходов, т/год	Количество размещенных отходов, т/год
Твердые коммунальные отходы и подобные им отходы	IV	445881,663	77786,494	8489,575	259,735	437132,352
	V	49520,538	7233,676	8951,516	1,795	40567,228
<b>ВСЕГО</b>		<b>495402,201</b>	<b>85020,170</b>	<b>17441,091</b>	<b>261,530</b>	<b>477699,580/ 1547699,580*</b>

\* Размещенных твердых коммунальных отходов Ленинградской области/всего размещенных с учетом отходов, поступивших из других субъектов РФ (г. Санкт-Петербург).



На сегодняшний день сжигание отходов — один из наиболее распространённых методов их утилизации. Низшая теплота сгорания рабочей массы отходов Ленинградской области составляет в среднем 7500–8000 кДж/кг, влажность — около 30–40 %, зольность — 25–30 % [6]. Использование ТБО как топлива для выработки тепловой и электрической энергии в противовес их захоронению экономит традиционные виды топлива (уголь, газ, мазут) и способствует снижению выбросов парниковых газов в атмосферу. При этом наиболее перспективным методом термической утилизации является газификация отходов. Газификация органического сырья — это способ превращения твердого или жидкого топлива в горючие газы путем неполного окисления воздухом (кислородом, водяным паром) при высокой температуре с возможным применением катализаторов и подогревом извне, что необходимо для протекания автотермического либо неавтотермического процессов.

Исследуемая проблематика актуальна для всех крупных и средних населенных пунктов. В этом отношении страны Европы имеют более богатый опыт, чем Российская Федерация; к примеру, в Эстонии активная работа по экологически обоснованному обращению с отходами ведется с 2010 года. Применяемое законодательство в данной сфере действует на региональном и федеральном уровнях. Основной его принцип, который относится ко всем производственным объектам в стране, — предотвращение загрязнения окружающей среды. Это предполагает экологический мониторинг, оценку негативного воздействия на окружающую среду, контроль за вредными выбросами, включение затрат на обращение с отходами в себестоимость и пр. Обращено внимание на повторное использование отходов, подготовку к использованию вторичных материалов, переработку вторичных материалов, получение энергии из отходов [7]. В то же время технология газификации ТБО находит все более широкое применение для установок малой мощности. В Португалии успешно эксплуатируются установки производительностью до 100 кг/ч при

поддержании температуры 750–850 °С в псевдоожиженном слое [8–10]. Укрупненно такая система состоит из узла подготовки сырья, реактора, блока охлаждения и очистки газа.

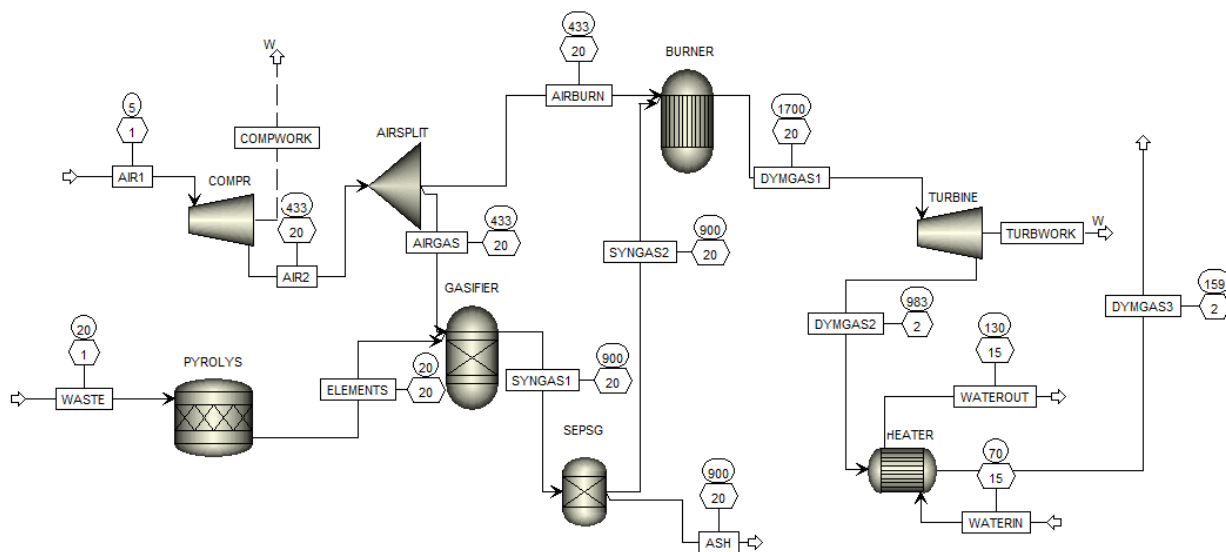
### Результаты и обсуждения

**Моделирование процесса газификации ТБО.** Для оценки теоретического потенциала продуктов газификации ТБО было выполнено моделирование в среде Aspen Plus. Данный программный продукт — один из основных инструментов, применяемых для решения подобных задач в российской и мировой науке [11–13].

На рисунке представлена смоделированная в среде Aspen Plus схема газификации ТБО. Она включает в себя непосредственно блок термической конверсии твердого топлива с разделением технологических зон на пиролиз и газификацию, воздушный компрессор, камеру сгорания получаемого синтез-газа, газовую турбину, котел-утилизатор и сепараторы.

На основании нормативов для учебных заведений<sup>1</sup> объем производимых в СПбПУ ТБО составляет 270 м<sup>3</sup>/мес. По предварительным расчетам такого количества отходов достаточно для выработки 12–15 кВт электрической энергии. Однако существующий типоразмер как отечественных, так и зарубежных газификаторов, а также генерирующих установок (ГТУ, ГПУ) предполагает использование оборудования с единичной мощностью не менее 60 кВт [14]. Поэтому в данной работе проводится моделирование газификации ТБО для установки с генерируемой электрической мощностью 100 кВт (за вычетом мощности приводов нагнетательного оборудования ГТУ). Предполагается, что при реализации данного проекта установка может использовать в качестве сырья не только отходы университета, но и бытового сектора близлежащего городского квартала. Морфологический и элементный состав исходного топлива принят согласно [15].

<sup>1</sup> 15. Постановление правительства Москвы № 9-ПП от 15.01.2008 г. Об утверждении норм накопления твердых бытовых отходов и крупногабаритного мусора.



Установка газификации ТБО в среде Aspen Plus  
MSW gasification unit in Aspen Plus environment

Основными энергетическими показателями работы установки являются выработки электрической и тепловой энергии. За показатели электрической энергии на схеме отвечают потоки TURBWORK и COMPWORK. Причем полезная выработка определяется разницей между механическими мощностями турбины и компрессорного оборудования. По результатам расчета полезная мощность установки составила 102 кВт.

Для сетевого подогревателя (HEATER) характерен нагрев сетевой воды в количестве 2,5 т/ч в пиковом режиме от 70 до 130 °С. Температура выбрасываемых в атмосферу дымовых газов при этом составляет 159 °С. Тогда расчетная тепловая мощность сетевого подогревателя равняется 203 кВт при расчетной поверхности 0,7 м<sup>2</sup> и среднем температурном нагреве 337 °С. Основные расчетные энергетические показатели установки газификации ТБО следующие:

Электрическая мощность ГТУ .....	102 кВт
Число часов использования номинальной мощности в году .....	7500 ч
Годовая выработка электроэнергии ..	765 000 кВт·ч/год
Тепловая мощность сетевого подогревателя .....	203 кВт
Расход ТБО (при теплоте сгорания на сухую массу 15,58 МДж/кг) .....	100 кг/ч
Электрический КПД установки .....	23,6 %
Тепловой КПД установки .....	46,9 %
Суммарный КПД установки .....	70,5 %

Таким образом, суммарный КПД по выработке тепловой и электрической энергии составляет 70,5 %. Эта величина сопоставима с показателями энергетических установок, работающих на альтернативном местном твердом топливе (древесина, торф и пр.). Однако явными преимуществами настоящего решения можно считать использование топлива с нулевой или «отрицательной» стоимостью, а также улучшение экологической ситуации в городе.

### Заключение

В работе проанализирована энергетическая эффективность использования твердых бытовых отходов для выработки тепловой и электрической энергии. В результате можно сформулировать следующие основные выводы:

существующий уровень переработки отходов в России очень низкий: переработка ТБО составляет 5–10 %, изношенных шин – 5–7 %, металлолома – 20–30 %, строительных отходов – 10–35 %;

объем производимых ТБО в СПбПУ – 270 м<sup>3</sup>/мес. По предварительным расчетам такого количества отходов достаточно для выработки 12–15 кВт электрической энергии;

расчетный КПД по выработке тепловой и электрической энергии для установки газификации ТБО в цикле с ГТУ и котлом-утилизатором составляет 70,5 %.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бернадинер И.М., Степанова Т.А., Хорева П.В., Чевычелов Д.Д., Николаев Д.А., Бернадинер М.Н.** Выбор оптимальных направлений переработки и обезвреживания осадков сточных вод // Экология и промышленность России. 2012. №6. С. 44–45. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-6-44-45>
2. **Бернадинер И.М., Степанова Т.А., Ключников А.Д., Чевычелов Д.Д., Хорева П.В., Николаев Д.А., Тумановский В.А., Бернадинер М.Н.** Термические методы обезвреживания осадков сточных вод // Экология и промышленность России. 2012. №7. С. 4–7. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-7-4-7>
3. **Bukova M., Bondal A., Skvortsova O., Nikonova O., Kholodiakov A., Guseva I., Makarova T., Mirschel W.** Reclamation of the illegal dump for sustainable development the environment in Sverdlovo of Leningrad Oblast', Russia // MATEC Web of Conferences. 2016, № 73. P. 146–148.
4. **Orlova T., Melnichuk A., Klimentko K., Vitvitskaya V., Popovych V., Dunaieva I., Terleev V., Nikonorov A., Togo I., Volkova Y., Mirschel W., Garmanov V.** Reclamation of landfills and dumps of municipal solid waste in a energy efficient waste management system: Methodology and practice // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. № 90(1). P. 012110.
5. **Maslikov V., Chusov A., Zhazhkov V., Vasilyeva O.** MSW Landfills Reclamation Based on Monitoring of Biogas Emissions // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. № 692. P. 908–914.
6. Комплексная переработка твердых бытовых отходов – наиболее передовая технология: Сборник трудов / Под ред. Я.Б. Данилевича, Е.Г. Семина. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
7. **Карпенко Н.И., Ярмаковский В.Н., Школьник Я.Ш.** Состояние и перспективы использования продуктов переработки техногенных образований в строительной индустрии // Экология и промышленность России. 2012. № 10. С. 50–54.
8. **Couto N.D., Silva V.B., Rouboa A.** Thermodynamic Evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification // Journal of Cleaner Production. 2016. № 139. P. 622–635.
9. **Silva V., Rouboa A.** Combining a 2-D multiphase CFD model with a response surface methodology to optimize the gasification of Portuguese biomasses // Energy Conv. Manag. 2015. № 99. P. 28–40.
10. **Silva V., Monteiro E., Couto N., Brito P., Rouboa A.** Analysis of syngas quality from Portuguese biomasses: an experimental and numerical study // Energy Fuel. 2014. № 28. P. 5766–5777.
11. **Ramzan N., Ashraf A., Naveed S., Malik A.** Simulation of hybrid biomass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste // Biomass and Bioenergy. 2011. № 35. P. 3962–3969.
12. **Fedyukhin A.V., Sultanguzin I.A., Gyl'maliev A.M., Sergeev V.V.** Biomass Pyrolysis and Gasification Comprehensive Modeling for Effective Power Generation at Combined Cycle Power Plant // Eurasian Chemical-Technological Journal. 2017. № 19(3). P. 245–253.
13. **François J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgaux O., Patisson F., Dufour A.** Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus // Chemical engineering transactions. 2012. №29. P. 769–774.
14. Официальный сайт компании ООО «Интерремаш» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.adaptika.ru/>
15. **Ильных Г.В.** Использование результатов определения морфологического состава твердых бытовых отходов для обоснования системы обращения с отходами // Вестник ПНИПУ. Урбанистика. 2012. № 1. С. 35–42.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ШАБУРОВ Евгений Леонидович** – директор департамента административно-хозяйственных служб Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

E-mail: [aes@spbstu.ru](mailto:aes@spbstu.ru)

**ФЕДЮХИН Александр Валерьевич** – кандидат технических наук старший преподаватель Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: [FedyukhinAV@yandex.ru](mailto:FedyukhinAV@yandex.ru)

**ИППОЛИТОВ Владимир Андреевич** – кандидат технических наук доцент Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: [iva\\_48@mail.ru](mailto:iva_48@mail.ru)

Дата поступления статьи в редакцию: 04.06.2018

## REFERENCES

- [1] **Bernadiner I.M., Stepanova T.A., Khoreva P.V., Chevychelov D.D., Nikolayev D.A., Bernadiner M.N.** Vybor optimalnykh napravleniy pererabotki i obezvrezhivaniya osadkov stochnykh vod [Selection of Optimal Trends of Processing and Neutralization of Sewage Sediments]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2012. № 6. S. 44–45. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-6-44-45>. (rus.)
- [2] **Bernadiner I.M., Stepanova T.A., Klyuchnikov A.D., Chevychelov D.D., Khoreva P.V., Nikolayev D.A., Tumanovskiy V.A., Bernadiner M.N.** Termicheskiye metody obezvrezhivaniya osadkov stochnykh vod [Thermal Methods of Sewage Sludge Neutralization]. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2012. № 7. S. 4–7. URL: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2012-7-4-7>. (rus.)
- [3] **Bukova M., Bondal A., Skvortsova O., Nikonova O., Kholodiakov A., Guseva I., Makarova T., Mirschel W.** Reclamation of the illegal dump for sustainable development the environment in Sverdlovo of Leningrad Oblast', Russia. *MATEC Web of Conferences*. 2016. № 73. S. 146–148. (rus.)
- [4] **Orlova T., Melnichuk A., Klimenko K., Vitvitskaya V., Popovych V., Dunaieva I., Terleev V., Nikonorov A., Togo I., Volkova Y., Mirschel W., Garmanov V.** Reclamation of landfills and dumps of municipal solid waste in a energy efficient waste management system: Methodology and practice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. № 90(1). S. 012110. (rus.)
- [5] **Maslikov V., Chusov A., Zhazhkov V., Vasilyeva O.** MSW Landfills Reclamation Based on Monitoring of Biogas Emissions. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. № 692. P. 908–914. (rus.)
- [6] **Kompleksnaya pererabotka tverdykh bytovykh otkhodov – naibolee peredovaya tekhnologiya: Sbornik trudov [Complex processing of municipal solid wastes] / Pod red. Ya.B. Danilevicha, Ye.G. Semina.** SPb.: Izd-vo SPbGTU, 2001. (rus.)
- [7] **Karpenko N.I., Yarmakovskiy V.N., Shkolnik Ya.Sh.** Sostoyaniye i perspektivy ispolzovaniya produktov pererabotki tekhnogennykh obrazovaniy v stroitelnoy industrii [Prospects of application of technogenic formations' derivate in building industry] // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2012. № 10. S. 50–54. (rus.)
- [8] **Couto N.D., Silva V.B., Rouboa A.** Thermodynamic Evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification // *Journal of Cleaner Production*. 2016. № 139. P. 622–635.
- [9] **Silva V., Rouboa A.** Combining a 2-D multi-phase CFD model with a response surface methodology to optimize the gasification of Portuguese bio-masses. // *Energy Conv. Manag.* 2015. № 99. P. 28–40.
- [10] **Silva V., Monteiro E., Couto N., Brito P., Rouboa A.** Analysis of syngas quality from Portuguese biomasses: an experimental and numerical study. *Energy Fuel*. 2014. № 28. P. 5766–5777.
- [11] **Ramzan N., Ashraf A., Naveed S., Malik A.** Simulation of hybrid bio-mass gasification using Aspen plus: A comparative performance analysis for food, municipal solid and poultry waste. *Biomass and Bioenergy*. 2011. № 35. P. 3962–3969.
- [12] **Fedyukhin A.V., Sultanguzin I.A., Gyul'maliev A.M., Sergeev V.V.** Biomass Pyrolysis and Gasification Comprehensive Modeling for Effective Power Generation at Combined Cycle Power Plant. *Eurasian Chemical-Technological Journal*. 2017. № 19(3). P. 245–253.
- [13] **François J., Abdelouahed L., Mauviel G., Feidt M., Rogaume C., Mirgoux O., Patisson F., Duffour A.** Estimation of the energy efficiency of a wood gasification CHP plant using Aspen Plus. *Chemical engineering transactions*. 2012. № 29. P. 769–774.
- [14] **Ofitsialnyy sayt kompanii OOO «Interremmash» [Elektronnyy resurs].** URL: <http://www.adaptika.ru/> (rus.)
- [15] **Ilinykh G.V.** Ispolzovaniye rezultatov opredeleniya morfologicheskogo sostava tverdykh bytovykh otkhodov dlya obosnovaniya sistemy obrashcheniya s otkhodami [Usage of data on morphological composition of municipal solid waste for feasibility of waste management system]. *Vestnik PNIPU. Urbanistika*. 2012. № 1. S. 35–42. (rus.)

## THE AUTHORS

**SHABUROV Evgenii L.** – *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: [aes@spbstu.ru](mailto:aes@spbstu.ru)

**FEDYUKHIN Aleksandr V.** – *National research university «Moscow power engineering institute»*

E-mail: [FedyukhinAV@yandex.ru](mailto:FedyukhinAV@yandex.ru)

**IPPOLITOV Vladimir A.** – *National research university «Moscow power engineering institute»*

E-mail: [iva\\_48@mail.ru](mailto:iva_48@mail.ru)

Received: 04.06.2018