DOI 10.15593/24111678/2021.02.01
УДК 628.477.6

О.Г. Грубер, И.С. Глушанкова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК

Одной из проблем в автотранспортной отрасли является утилизация отслуживших свой срок автомобильных покрышек. Однако затраты электроэнергии на производственных линиях по переработке повышают экономические затраты и не способствуют развитию данного вида деятельности.

При проведении научно-исследовательской работы поставлена цель снизить энергетические затраты при механическом методе переработки отработанных автомобильных шин в резиновую крошку за счет применения дополнительного метода пиролизной переработки резинотехнических изделий (РТИ). Полученное пиролизное топливо предполагается использовать для генерации тепло- и электроэнергии. Основной проблемой применения данного вида топлива являются вредные негорючие компоненты, образующиеся при пиролизе автопокрышек, негативно влияющие на экологичность выхлопных газов генераторных установок.

Для решения проблемы очистки рассмотрены основные методы, применяемые на сегодняшний день, и описан более экономичный и эффективный с учетом последних исследований. В качестве оптимального способа очистки рекомендуется адсорбционная установка, основными сорбентами которой являются синтетический цеолит CaA и модифицированный природный морденит. Предложена модернизация промышленной установки ЭП-30 с исключением из системы узла щелочного абсорбера и заменой в аппаратах адсорбера обычно используемых адсорбентов КА-ЗМ, окиси алюминия, силикагеля и т.д., вследствие чего упрощается технологический процесс, снижаются энергетические и экономические затраты.

Следующим этапом после очистки пиролизных газов является выбор способа получения электрической и тепловой энергии, в качестве которого предложен метод когенерации. В зависимости от потребляемой установкой по переработке РТИ в резиновую крошку электроэнергии выбран тип когенерационной установки и разработана технологическая схема процесса. Для небольшого производства целесообразно использовать микротурбинные когенераторы, в которых используются газотурбинные генераторы малой мощности.

Модернизация предприятия по производству резиновой крошки из отходов автотранспортной отрасли позволит расширить методы утилизации РТИ и номенклатуру выпускаемой продукции, снизить экономические затраты на потребляемую электроэнергию при рациональном использовании ресурсов.

Ключевые слова: утилизация, автомобильные покрышки, измельчение, энергозатраты, пиролиз, металлический и текстильный корд, когенерации.

O.G. Gruber, I.S. Glushankova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF RESOURCE AND ENERGY SAVING TECHNOLOGY FOR RECYCLING USED CAR TIRES

One of the problems in the automotive industry is the disposal of used tires. However, the cost of electricity on processing production lines increases economic costs and does not contribute to the development of this type of activity.

When carrying out the research work, the goal was to reduce energy costs during the mechanical method of processing used car tires into rubber crumb, through the use of an additional method of pyrolysis processing of industrial rubber articles (IRA). The resulting pyrolysis fuel is supposed to be used to generate heat and electricity. The main problem of usingf this type of fuel is the harmful, non-combustible components formed during the pyrolysis of car tires, which negatively affect the environmental friendliness of the exhaust gases of generator sets.

To solve the problem of cleaning, the main methods used at the moment are examined, and a more economical and effective one is described, taking into account the latest research. An adsorption plant is recommended as the optimal cleaning method, the main sorbents of which are synthetic *CaA* zeolite and modified natural mordenite. The modernization of the EP-30 industrial plant was proposed with the exclusion of the alkaline absorber unit from the system and the replacement of the commonly used in the adsorbers KA-ZM adsorbents, aluminum oxide, silica gel, etc. As a result, the technological process is simplified; energy and economic costs are reduced.

The next step after the purification of pyrolysis gases is the choice of a method for obtaining electrical and thermal energy, which is the proposed method of cogeneration. Depending on the electricity consumed by the plant for processing IRA into crumb rubber, the type of cogeneration unit was selected and the process flow diagram was developed. For small production, it is advisable to use microturbine cogenerators, which use low-power gas turbine generators.

Modernization of an enterprise for the production of rubber crump from the waste of the motor transport industry will expand the methods of IRA disposal and the range of products; reduce the economic costs of consumed electricity with the rational use of resources.

Keywords: recycling, car tires, shredding, energy consumption, pyrolysis, metal and textile cord, cogeneration.

Введение

Одной из актуальных экологических и технологических проблем развития автомобильного транспорта является утилизация и переработка отработанных автомобильных шин. В России ежегодно образуется более 850 тыс. т отходов резино-технических изделий (РТИ) [1]. Из всей массы ежегодно образующихся в мире отработанных шин перерабатывается только 30 %.

Проведенный анализ научно-технической информации показал, что наиболее экономически целесообразным методом переработки РТИ является низкотемпературный пиролиз с получением жидкого топлива. Использование пиролизных технологий переработки автомобильных покрышек позволяет проводить процесс в автотермическом режиме (без дополнительных энергетических затрат) без предварительной подготовки отходов к переработке (измельчение, отделение металлических включений и т.п.) и получать дополнительный энергетический ресурс – пиролизный газ и жидкое топливо [2–4].

Средний объем пиролизного газа, выделенного из 1 кг сырья, составляет 2,5 м^3. Состав газовой фазы зависит от компонентов, из которых были изготовлены шины, и метода пиролиза (установки с внешним разогревом и непосредственной подачей топлива в реактор). Экспериментальные исследования, проводимые на кафедре «Эксплуатации автомобильного транспорта и автосервис» автодорожного факультета СВФУ имени М.К. Аммосова при помощи лабораторной пиролизной установки ГВА-1, показали следующие результаты [5]:

Компонент	CO	H_2	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	CO_2	O_2	H_2S
Проценты объемные	6,2	17,9	32,4	14,3	6,0	3,1	10,9	5,9	3,3

Содержание горючих газов, схожих по составу с природным газом, составляет в среднем 55 %. Для максимального использования энергетического потенциала образующегося пиролизного газа необходимо решение нескольких проблем, связанных с очисткой пиролизного газа от углекислого газа и других негорючих соединений, а также от серосодержащих соединений и выбором способа получения электрической и тепловой энергии из очищенного пиролизного газа.

1. Очистка пиролизных газов

Для очистки пиролизного газа используются следующие основные методы:

1. *Абсорбция* – заключается в поглощении отдельных компонентов газообразной смеси жидким поглотителем – абсорбентом.

2. *Щелочной способ* – очистка газов пиролиза углеводородного сырья от двуокиси углерода и сероводорода со сбросом образующихся сернисто-щелочных стоков в канализацию [6].

3. *Адсорбция* – процесс концентрирования одного или нескольких компонентов (адсорбата) из газовой среды на поверхности твердого микропористого поглотителя – адсорбента.

4. *Электрохимический* способ очистки [7].

В промышленных установках применяются комбинированные технологии очистки пиролизных газов, включающие стадии компрессии, абсорбционной (совмещен с щелочным) и адсобционной (осушка от влаги) очистки.

Устройство очистки пиролизного газа от сероводорода рассмотрим на примере промышленной установки ЭП-300 (рис. 1) [8].

Пиролизный газ подается на компрессорный узел $К_i$, где по мере прохождения четырех ступеней повышается давление до 19 атм. Продвижение газа через конденсаторы X_i и сепараторы V_i способствует выделению части компонентов. На следующем этапе газ подается в блок очистки от сернистых соединений и осушки от влаги адсорбционным методом на адсорберах $С_1$–$С_3$.

Для осушки и очистки газов от сероводорода в технологии в качестве сорбентов используются цеолит СаА и модифицированный природный морденит.

Синтетические и природные цеолиты обладают молекулярно-ситовыми свойствами, благодаря чему широко применяются в качестве адсорбентов. Синтетические цеолиты СаА (молекулярные сита) – алюмосиликатные микропористые адсорбенты с кристаллическим строением и большой удельной поверхностью. Способны разделять вещества с разными размерами и формой молекул при обычных температурах и при низких давлениях [9].

В сочетании с модифицированным природным морденитом, обладающим устойчивостью к действию кислот и температур, способным абсорбировать вещества из внешней среды и при этом отдавать компоненты своего состава, увеличивается эффективность и скорость очистки газов.

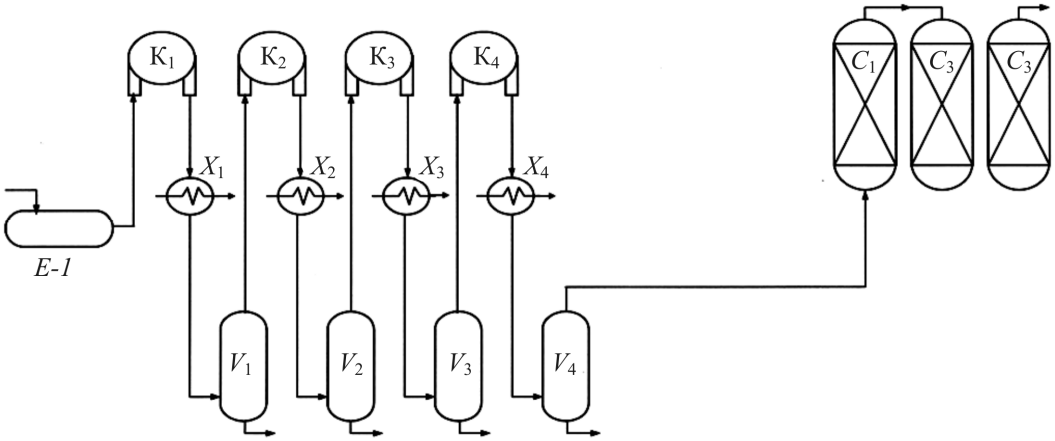

Рис. 1. Технологическая схема блока очистки пирогаза от сернистых соединений промышленной установки ЭП-300: $К_i$ – компрессоры; X_i – холодильники; V_i – сепараторы; C_i – адсорберы

При выборе способа очистки предпочтение следует отдать адсорбции, так как пиролизный газ на выходе получается более высокой степени очистки. Метод адсорбции является экономически более выгодным, чем щелочной и абсорционный, из-за снижения затрат на использование больших объемов щелочного раствора и исключения из технологического процесса узла абсорбера. Соответственно, снижаются и энергозатраты, что отвечает целям, поставленным в данной статье.

2. Выбор способа получения электрической и тепловой энергии

Следующим этапом решения проблем в области ресурсо- и энергосберегающих технологий является выбор способа получения электрической и тепловой энергии из очищенного пиролизного газа. Оптимальным решением данной задачи является когенерация, которая обозначает комбинированную генерацию различных видов энергии [10, 11].

Системы когенерации состоят из следующих основных узлов:

– первичный двигатель;

– электрогенератор;

– система утилизации тепла.

Тип первичного двигателя определяет, к какому виду когенерационных установок относится та или иная система:

– газотурбинные;

– газопоршневые;

– микротурбинные.

В газотурбинных мини-ТЭЦ первичным двигателем служит газовая турбина (ГТ). Данные установки используются преимущественно для покрытия потребностей электроэнергии крупными промышленными предприятиями; целесообразность применения в диапазоне мощностей от 6 МВт и выше [12].

В газопоршневых мини-ТЭЦ основным узлом является поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) на газообразном топливе. Газопоршневые установки на сегодняшний день являются наиболее распространенными и характеризуются высокой эффективностью топливоиспользования (КПД может достигать 90 %) [13].

Новейшим типом когенерационных установок стали микротурбинные когенераторы, в которых используются газотурбинные генераторы малой мощности (25–300 кВт) [14].

Основное преимущество микротурбинных когенерационных установок – возможность работы с переменной нагрузкой в диапазоне от 0 до 100 % без сокращения ресурса. Также микротурбинные установки характеризуются низким уровнем шума при работе и хорошими экологическими показателями, что позволяет использовать их в жилых районах. Общий КПД микротурбинных когенераторов составляет 85–90 % [15].

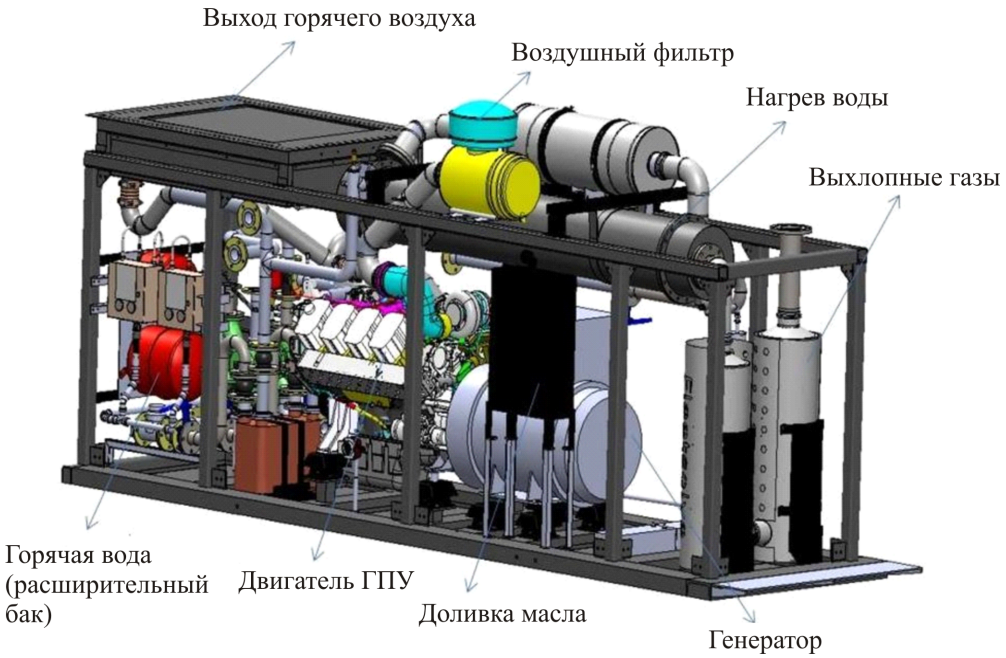

Рис. 2. Схема когенерационной установки

Мини-ТЭЦ на базе газового двигателя должна покрывать приблизительно 30–50 % максимальной ежегодной потребности предприятия в тепловой энергии. Остальная тепловая нагрузка обеспечивается пиковыми водонагревательными котлами.

На основании проведенного анализа разработана технология переработки автомобильных покрышек с получением электроэнергии в микротурбинной установке.

На первом этапе происходит приемка и сортировка отходов РТИ, складирование и подготовка к переработке (А1).

Далее часть сырья поступает на линию измельчения автомобильных шин в резиновую крошку (А2). На данном этапе происходит отделение металлического и текстильного корда. Установка потребляет от 140 до 200 кВт электроэнергии в час. Помещение, в котором установлена линия измельчения, в холодное время года отапливается.

Другая часть сырья, в том числе трудно перерабатываемые РТИ (полнонаполненные шины от автопогрузчиков, шипованные покрышки и др.), поступает в пиролизные установки (А3). Полученные продукты пиролиза распределяются по видам (металлолом, пиролизный газ и углеродный остаток).

Пиролизный газ поступает на блок очистки и далее – на газогенератор, парогенератор, на горелки пиролизных установок. Излишки газа реализуются как топливо или сырье для химической промышленности.

Технологическая схема процесса представлена на рис. 3.

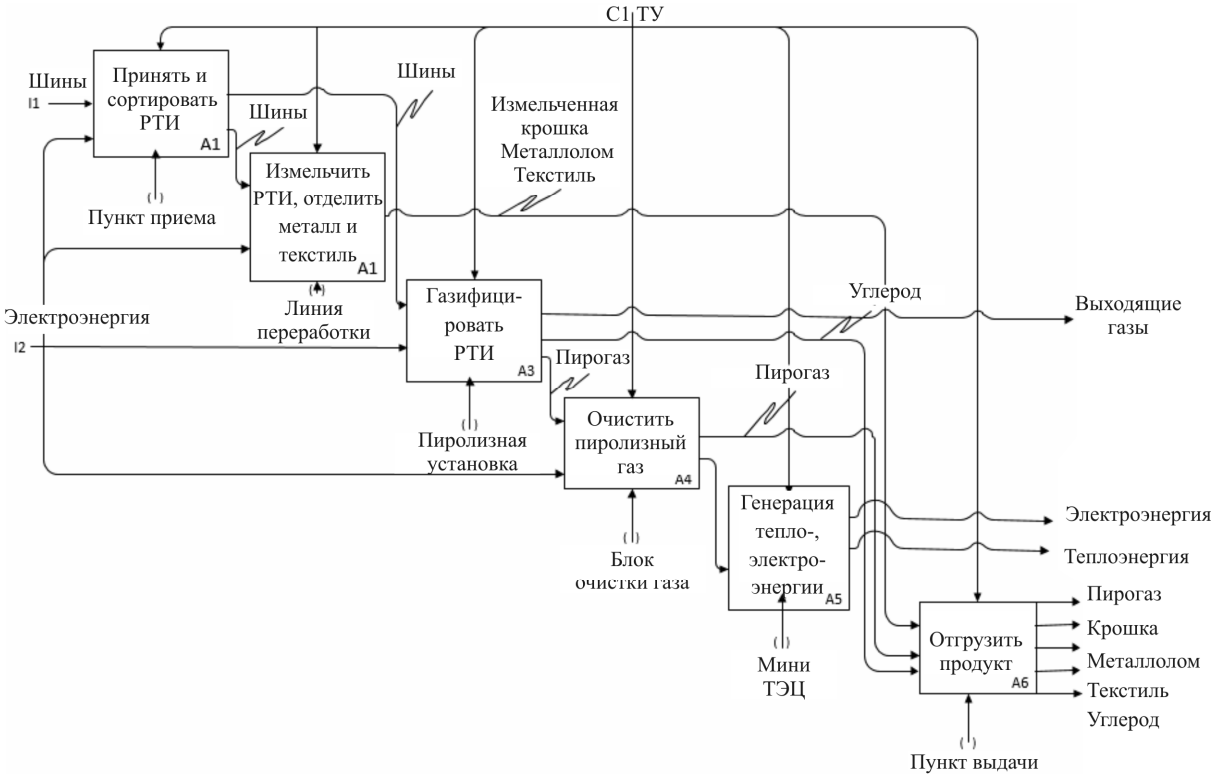

Рис. 3. Графическая модель производства резиновой крошки

Вывод

Предложенная модернизация производства существенно экономит ресурсы и электроэнергию при переработке отходов. Пиролизная переработка РТИ увеличивает объем утилизации отходов и виды получаемых продуктов.

Основным элементом разрабатываемой технологической цепочки является блок очистки пирогаза от примесей. Применение адсорбента синтетического цеолита CaA и модифицированного природного морденита позволит снизить затраты на подготовку пиролизного газа к использованию в качестве топлива для микротурбинной когенерационной установки. Такая установка способна покрыть потребности в электроэнергии предприятия по переработке отработанных шин в крошку.

Список литературы

1. Ильина Л.В., Павлова Л.А. Проблема утилизации изношенных шин и пути ее решения // Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы: сб. ст. – М.: Наука: Просвещение, 2017. – С. 169–172.

2. Очистка пиролизного газа для альтернативной теплоэнергетики / И.П. Добровольский, Ю.Ш. Капкаев, Д.А. Сорокин, П.Р. Кадыров // Энергосбережение – теория и практика: сб. тр. конф. – М.: Изд. дом МЭИ, 2018. – С. 422–427.

3. Спиридонова А.В., Друзьянова В.П. Пиролизный способ получения альтернативного моторного топлива // Вестник ИРГСХА. – 2018. – № 84. – С. 150–156.

4. Ладыгин К.В., Стомпель С.И., Спектор Ю.Л. Альтернативная энергия из отходов: только факты // Твердые бытовые отходы. – 2018. – № 12 (126). – С. 22–23.

5. Спиридонова А.В., Друзьянова В.П. Получение альтернативного моторного топлива из пиролизного газа // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации: сб. науч. тр. – Иркутск: ИРНИТУ, 2019. – С. 223–231.

6. Шахтахтинский Т.Н., Ибрагимов Ч.Ш., Бабаев А.И. Системный анализ процессов разделения и очистки продуктов нефтехимии. – Баку: ЭЛМ, 2006. – С. 120–124.

7. Абдуллаева М.Я., Алиева С.А. Электрохимический способ очистки H_2S, SO_2 в пиролизных газах // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. науч. тр. – Новосибирск: Ассоциация научных сотрудников «Сибирская академическая книга», 2017. – С. 30–33.

8. Ибрагимов Ч.Ш., Юсубов Ф.В. Адсорбционная очистка пиролизного газа от сероводорода // Наука, техника и образование: сб. науч. тр. – 2017. – Т. 17, № 5 (35). – С. 25–29.

9. Изменение поверхностных характеристик цинкмодифицированного цеолита типа H-ZSM-5 в процессе трансформации метанола в синтетические углеводороды / А.И. Сидоров, В.П. Молчанов, Л.С. Мушинский, Р.В. Бровко // Бюллетень науки и практики. – 2020. – Т. 6, № 11. – С. 23–30.

10. Азанова Е.В., Мелехин А.А. Применение когенерации для энергоснабжения в Пермском крае // Наука молодых – Будущее России: сб. науч. тр. – Университетская книга, 2016. – С. 308–311.

11. Бородин А.К. Роль когенерации в современной энергетике // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодежного форума: сб. науч. тр. / Нац. исслед. Томск. политехн. ун-т. – Томск, 2016. – С. 164–165.

12. Сарафанова Ю.В., Филиппов В.В. Использование мини-ТЭЦ в котельной для производства электрической энергии на собственные нужды // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 26. – С. 1452 –1457.

13. Абдуллин В.Ю., Репин В.В. Сравнение газотурбинного и газопоршневого двигателя как основного привода мини-ТЭЦ // Интернаука. – 2020. – № 12–1 (141). – С. 50–51.

14. Щинников П.А., Томилов В.Г., Синельников С.С. Методические особенности исследования микротэс на базе двигателей внутреннего сгорания с воздушным охлаждением и когенерацией // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 1. – С. 161–166.

15. Малая Э.М., Николаева Е.И. Создание оптимальных проектных решений при использовании комбинированной генерации различных видов энергии // Техническое регулирование в транспортном строительстве: сб. науч. тр. – 2019. – № 4 (37). – С. 222–226.

References

1. Il'ina L.V., Pavlova L.A. Problema utilizatsii iznoshennykh shin i puti ee resheniia [The problem of recycling waste tires and ways to solve it] *Nauka i Prosveshchenie*, 2017, pp. 169–172.

2. Dobrovol'skii I.P., Kapkaev Iu.Sh., Sorokin D.A., Kadyrov P.R. Ochistka piroliznogo gaza dlia al'ternativnoi teploenergetiki [Pyrolysis gas purification for alternative heat power generation] *Izdatel'skii dom MEI*, 2018, pp. 422–427.

3. Spiridonova A.V., Druz'ianova V.P. Piroliznyi sposob polucheniia al'ternativnogo motornogo topliva [Pyrolysic method of obtaining alternative motor fuel] *Vestnik IrGSCHA*, 2018, no. 84, pp. 150–156.

4. Ladygin K.V., Stompel' S.I., Spektor Iu.L. Al'ternativnaia energiia iz otkhodov: tol'ko fakty [Alternative energy from waste: just the facts] *Tverdye Bytovye Otkhody*, 2018, no. 12 (16), pp. 22–23.

5. Spiridonova, A.V., Druz'ianova V.P. Poluchenie al'ternativnogo motornogo topliva iz piroliznogo gaza [Production of alternative motor fuel from pyrolysis gas] *Irkutsk National Research Technical University*, 2019, pp. 223–231.

6. Shakhtakhtinskii T.N., Ibragimov Ch.Sh., Babaev A.I. Sistemnyi analiz protsessov razdeleniia i ochistki produktov neftekhimii [System analysis of the processes of separation and purification of petrochemical products] *Izdatel'stvo Elm*, 2016, pp. 120–124.

7. Abdullaeva M.Ia., Alieva S.A. Elektrokhimicheskii sposob ochistki H_2S, SO_2 v piroliznykh gazakh [Electrochemical method for removal H_2S, SO_2 in pyrolysis gases] *Assotsiatsiia Nauchnykh Sotrudnikov Sibirskaia Akademicheskaia Kniga*, 2017, pp. 30–33.

8. Ibragimov Ch.Sh., Iusubov F.V. Adsorbtsionnaia ochistka piroliznogo gaza ot serovodoroda [Adsorption cleaning of pyrolysis gas from sulfur riner] *Nauka, Tekhnika i Obrazovanie*, 2017, vol. 17, no. 5 (35), pp. 25–29. DOI: 10.20861/2312-8267-2017-35-002

9. Sidorov A.I., Molchanov V.P., Mushinskii L.S., Brovko R.V. Izmenenie poverkhnostnykh kharakteristik tsink-modifitsirovannogo tseolita tipa H-ZSM-5 v protsesse transformatsii metanola v sinteticheskie uglevodorody [Surface characteristics change of zinc modified H-ZSM-5 zeolites in methanol to hydrocarbons transformation process] *Biulleten' Nauki i Praktiki*, 2020, vjl. 6, no. 11, pp. 23–30.

10. Azanova E.V., Melekhin A.A. Primenenie kogeneratsii dlia energosnabzheniia v Permskom krae [Application of cogeneration for power supply in the Perm Region] Izdatel'stvo Zakrytoe Aktsionernoe Obshchestvo Universitetskaia Kniga, 2016, pp. 308–311.

11. Borodin, A.K. Rol' kogeneratsii v sovremennoi energetike [The role of cogeneration in modern energy industry] *Natsional'nyi Issledovatel'skii Tomskii Politekhnicheskii Universitet*, 2016, pp. 164–65.

12. Sarafanova Iu.V., Filippov V.V. Ispol'zovanie mini-TETs v kotel'noi dlia proizvodstva elektricheskoi energii na sobstvennye nuzhdy [Use of a mini thermal power plant in a boiler room for the production of electric energy for their own needs] *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, no. 26, pp. 1452–1457.

13. Abdullin V.Iu., Repin V.V. Sravnenie gazoturbinnogo i gazoporshnevogo dvigatelia kak osnovnogo privoda mini-TETs [Comparison of gas turbine and gas piston engines as the main drive of a mini thermal power plant] *Internauka*, 2020, no. 12–1 (141), pp. 50–51.

14. Shchinnikov P.A., Tomilov V.G., Sinel'nikov S.S. Metodicheskie osobennosti issledovaniia mikrotes na baze dvigatelei vnutrennego sgoraniia s vozdushnym okhlazhdeniem i kogeneratsiei [Methodological specifics of the study of micro hpp based on internal combustion engines with air cooling and cogeneration] *Thermophysics and Aeromechanics*, 2017, vol. 24, no. 1, pp. 159–164.

15. Malaia E.M., Nikolaeva E.I. Sozdanie optimal'nykh proektnykh reshenii pri ispol'zovanii kombinirovannoi generatsii razlichnykh vidov energii [Creating optimal design decisions when using combined generation of different types of energy] *Tekhnicheskoe Regulirovanie v Transportnom Stroitel'stve*, 2019, no. 4 (37), pp. 222–226.

Получено 09.04.2021

Об авторах

Грубер Олег Георгиевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oleg-gru@yandex.ru).

Глушанкова Ирина Самуиловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: irina_chem@mail.ru).

About the authors

Oleg G. Gruber (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: oleg-gru@yandex.ru).

Irina S. Glushankova (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Environmental Protection, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: irina_chem@mail.ru).