

УДК 519.87:620.95+631.862

DOI: 10.24412/1999-6837-2021-4-196-203

**Математическое описание процесса пиролиза твердого бесподстилочного навоза****Анастасия Валериевна Спиридонова<sup>1</sup>, Варвара Петровна Друзьянова<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,  
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия<sup>2</sup> Октемский филиал Арктического государственного агротехнологического университета,  
Республика Саха (Якутия), с. Октемцы, Россия<sup>1</sup> [Savadf0706@mail.ru](mailto:Savadf0706@mail.ru), <sup>2</sup> [druzvar@mai.ru](mailto:druzvar@mai.ru)

**Аннотация.** Результатами производства сельскохозяйственных ферм являются не только животноводческие продукты, но и органические отходы: например, бесподстилочный навоз крупного рогатого скота. В настоящее время в аграрном секторе Якутии отсутствуют технологии по переработке бесподстилочного навоза. Как результат, наносится колоссальный вред окружающей среде. Низкие температуры окружающего воздуха способствуют эффективной консервации вредоносной, злокачественной микрофлоры и семян сорных растений, содержащихся в навозе. Также вносит свой вклад вечная мерзлота – по весне происходит вспучивание земли, и находящиеся на поверхности отходы активно смываются талыми водами, интенсивно загрязняются низменные земли и открытые водоемы. Республика Саха (Якутия) характеризуется значительными объемами земельных ресурсов. Однако земель, подходящих для сельскохозяйственного освоения, недостаточно. Исходя из статистических данных, по результатам работы отраслей растениеводства и животноводства за последние несколько лет, можно констатировать о негативной динамике производства продукции агропромышленного комплекса. На сегодняшний день в Якутии крупный рогатый скот, в основном, содержится в примитивных строениях – «хотонах», которые в силу своих конструктивных особенностей исключают установки в них современного технологического оборудования. Ввиду отсутствия подстилочных материалов (соломы, опилок), скот содержится бесподстилочно. Производимый бесподстилочный навоз формируют в брикеты и вывозят на близлежащие поля или другие открытые участки. В климатических условиях Якутии навоз, вывезенный в осенний и зимний периоды на поля, за короткое лето не успевает оттаять, в результате чего начинает выступать в качестве серьезной помехи в процессе обработки почвы. А кучи, вывезенные в близлежащие открытые участки, превращаются в места скопления грызунов и хранилище семян сорных растений. Таким образом, назрела необходимость разработки и внедрения технологии для утилизации твердой массы бесподстилочного навоза.

**Ключевые слова:** технология утилизации, крупный рогатый скот, органические отходы, твёрдый бесподстилочный навоз, переработка, пиролизная технология, пиролизный газ, математическая зависимость

**Для цитирования:** Спиридонова А. В., Друзьянова В. П. Математическое описание процесса пиролиза твердого бесподстилочного навоза // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. Вып. 4 (60). С. 196–203. doi: 10.24412/1999-6837-2021-4-196-203.

**Mathematical description of the pyrolysis process of solid litterless manure****Anastasiya V. Spiridonova<sup>1</sup>, Varvara P. Druzianova<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov,  
Sakha Republic (Yakutia), Yakutsk, Russia<sup>1</sup> Oktemsky Branch of the Arctic State Agrotechnological University,  
Sakha Republic (Yakutia), Oktemtsy, Russia<sup>1</sup> [Savadf0706@mail.ru](mailto:Savadf0706@mail.ru), <sup>2</sup> [druzvar@mai.ru](mailto:druzvar@mai.ru)

**Abstract.** The results of the production of agricultural farms are not only livestock products, but also organic waste, such as litterless cattle manure. Currently, the consequences of the lack of manure disposal systems in the agrarian sector of Yakutia cause colossal environmental damage. Low ambient temperatures contribute to the effective conservation of harmful, malignant microflora and weed seeds in the manure content. Permafrost also affects – in the spring, when the earth swells, the waste on the surface is actively spread away by melt water, and subsequently pollute low-lying lands and open waters. The Republic of Sakha (Yakutia) is characterized by significant volumes of land resources. However, there is not enough land suitable for agricultural development. Based on statistical data of the crop and livestock results over the past few years, we can state the negative dynamic production of the agro-industrial complex. To date in Yakutia, cattle are mainly kept in primitive structures for livestock of the national type – «khotons», which, due to their structural features, do not allow technological equipment to be installed in them. The produced litterless manure is formed into briquettes and transported to nearby fields or other open areas. In the climatic conditions of Yakutia, manure transported to the fields in autumn and winter does not have time to thaw in a short summer, as a result of which it begins to act as a serious obstacle to the soil cultivation process. Manure piles, taken to nearby open areas, turn into places of rodent swarm and weed seed storage. Thus, there is a need to develop and introduce technology for the disposal of solid mass of litterless manure.

**Keywords:** utilization technology, cattle, organic waste, solid litterless manure, processing, pyrolysis technology, pyrolysis gas, mathematical dependence

**For citation:** Spiridonova A. V., Druzianova V. P. Mathematical description of the pyrolysis process of solid litterless manure. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik = Far Eastern Agrarian Herald*. 2021; 4 (60): 196–203. (In Russ.). doi: 10.24412/1999-6837-2021-4-196-203.

**Введение.** В аграрном секторе Якутии производимый бесподстилочный навоз животных не перерабатывается и не обеззараживается, отсутствуют технологии по его утилизации. Ввиду того, что частные фермы локализованы в местах поселения, то в данное время села опоясаны хаотично стаскиваемыми кучами твердого навоза. Наносится огромный вред окружающей среде, создаются благоприятные условия для сохранения семян сорных растений, возбудителей различных болезней и размножения мелких грызунов. Из года в год агрессивные кучи засохшего твердого необеззараженного навоза возрастают. Происходит разрушающее воздействие необработанного бесподстилочного навоза на хрупкую природу Якутии, обостряемое обратной реакцией вечной мерзлоты [5, 12, 13].

Проведённые теоретические исследования позволили наметить пути решения данной проблемы путём внедрения новых технологических решений.

Количество крупного рогатого скота, лошадей, свиней, оленей в Республике Саха (Якутия) на конец 2020 г. составляет 540 тыс. голов. Они ежедневно образуют органические отходы в виде навоза. Известно, что одна тонна свежего навоза поглощает в сутки до пяти тонн кислорода,

а при использовании необеззараженного навоза в виде удобрения в почву вносится до 14 млн. семян сорных растений, в атмосферу выбрасывается ощутимый объём углекислого газа и метана. Естественное перепревание навоза в условиях Якутии происходит в течение 36–48 месяцев.

Чтобы стабилизировать, и в перспективе, улучшить экологическую ситуацию в Республике Саха (Якутия), предлагается внедрить наиболее подходящую в данном случае пиролизную технологию утилизации твердого бесподстилочного навоза крупного рогатого скота.

Следует отметить, что пиролизная технология позволит улучшить экологию за счет утилизации навоза в зольное удобрение, содержащее доступные и легкорастворимые растениями калий, кальций, фосфор, серу, магний, марганец, бор, и другие микро- и макроэлементы.

Наравне с вышеназванным эффектом, внедрение установок пиролиза даёт возможность получать альтернативное топливо в виде пиролизного газа, который можно сжигать напрямую в котлах отопления или же преобразовывать в моторное топливо или электрическую энергию. Соответственно, фермеры могут создавать независимое автономное производство.

В работе обоснована эффективность использования данной технологии с получением сопутствующего продукта (пиролизного газа), являющегося альтернативным источником энергии.

**Методика исследований.** Используются эмпирические и теоретические методы исследования, которые базируются на экспериментальных данных и известных положениях системного анализа, математического моделирования. В исследовательской деятельности применён математический аппарат линейного программирования, дифференциального и интегрального исчисления. Полученные в ходе проведения экспериментов результаты подвергнуты обработке в соответствии с современными методами теории вероятностей, математической статистики и перспективного планирования экспериментальных исследований с применением специализированных программ.

**Результаты и обсуждение.** Пионером по изучению и внедрению пиролизной технологии в России является Александр Александрович Летний. После него данной технологией занимались В. В. Бакаев, Ю. Ю. Косивцов, В. Г. Бондалетов, И. П. Добровольский, В. В. Копытов, Т. Н. Шахта-

тинский, Ч. Ш. Ибрагимов, З. А. Мамедов, Ф. В. Юсубов, Н. В. Кельцев, В. А. Глушков и др. [1–4, 6, 7, 9, 11].

Однако вышеприведённые виды пиролизной технологии направлены на получение жидкого альтернативного топлива, и имеют в своем составе сложные устройства и оборудование. Они весьма внушительны по своим габаритам и требуют специальных помещений, значительных площадей, сооружения автономных электростанций. В этой связи исключается возможность внедрения данных технологий в аграрный сектор Якутии.

В животноводстве республики преобладают малые фермерские хозяйства. Поэтому, малогабаритная и мобильная технология В. А. Глушкова как нельзя лучше подходит для внедрения (рис. 1). Данная разработка отмечена Золотой медалью Российской академии наук в 2009 г. Она позволяет полностью разлагать твердые растительные вещества (биомассы) с получением смеси газов, пригодных для использования в качестве альтернативного топлива: в системах отопления помещений, при приготовлении пищи и как моторное топливо [3].

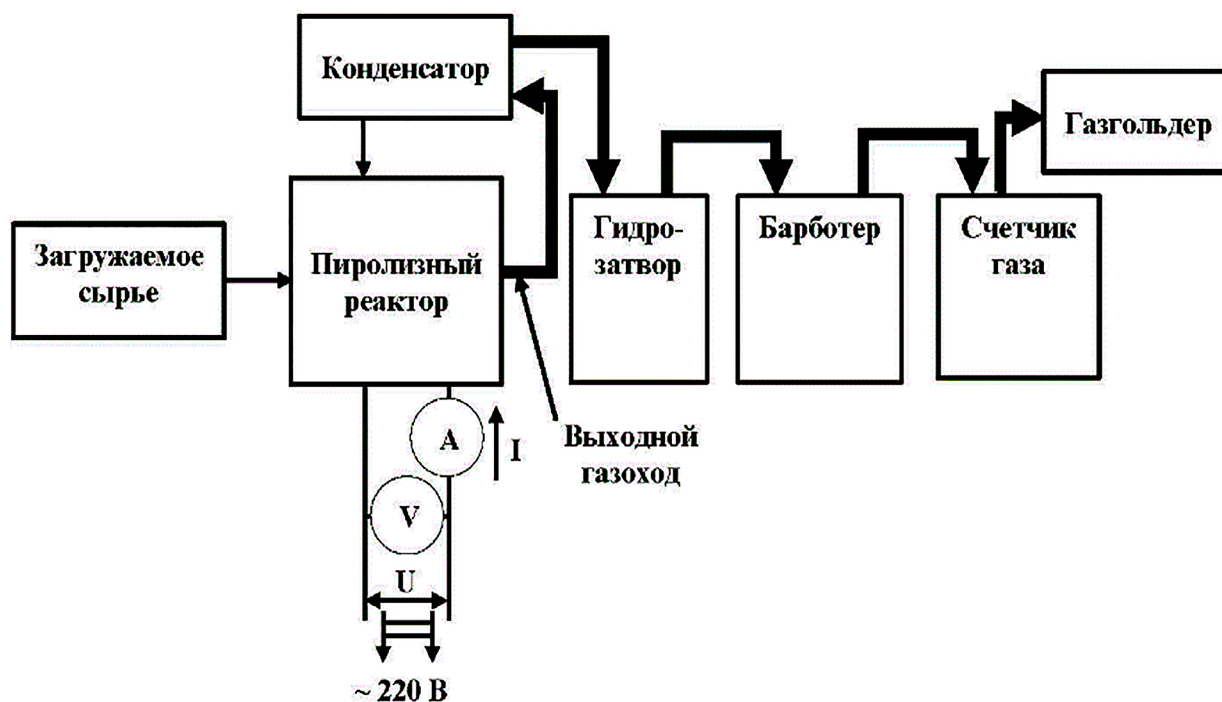


Рисунок 1 – Принципиальная схема пиролизной технологии В. А. Глушкова

Известные модели процесса пиролиза, разработанные учёными зарубежных стран, используются для расчёта состава продуктов пиролиза углеводородного сырья на промышленных производствах [8].

Так, учёные известной нидерландской фирмы разработали методологию с использованием программы моделирования пиролизных печей *SPYRO* для проектирования печей по заказу.

Программа моделирует процесс пиролиза различного углеводородного сырья от этана до лигроина. Кинетическая модель включает механизм из двух тысяч реакций [10].

Таким образом, можно констатировать, что существующие в настоящее время математические модели процесса пиролиза:

1. Применимы для описания химических реакций, протекающих внутри пиролизной установки при утилизации углеводородного сырья.

2. Модель В. А. Глушкова описывает процесс утилизации растительного сырья (биомассы) и подходит для адекватного описания процесса пиролиза твёрдого бесподстилочного навоза.

Нами изучены математические модели пиролизного процесса. Обнаружено, что подавляющее количество моделей описывают химический процесс, протекающий в тех или иных реакторах. На сегодняшний день только модель В. А. Глушкова описывает технологический процесс пиролиза. Данная модель процесса пиролиза в установившемся режиме имеет вид в соответствии с формулой (1):

$$Q(m) = K_n \cdot t \quad (1)$$

где  $Q(m)$  – требуемое количество энергии, Вт·мин;

$K_n$  – коэффициент пиролиза сырья при установившейся температуре в термореакторе на уровне 3 000 °С;

$t$  – масса твёрдого отхода, г.

Коэффициент пиролиза ( $K_n$ ) получен и обоснован В. А. Глушковым и применяется при описании процесса пиролизной утилизации отхода в виде твёрдой биомассы. Его значение составляет 605,7. При переводе минут в секунды значение

коэффициента пиролиза при применении формулы (1) составит 0,16.

Следует отметить, что данная модель учитывает только массу утилизируемого сырья, а такой значимый параметр, как влажность, игнорируется. В связи с этим, предлагаем внести коррективы.

Известно, что масса – это физическая величина, которая является мерой инертности тела и выражается формулой (2):

$$m = \rho \cdot V \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность пиролиза, кг/м<sup>3</sup>;  
 $V$  – объём пиролизного газа, м<sup>3</sup>.

Сырьё примем за твердое сыпучее вещество и для определения его объёма будем пользоваться формулой для прямого кругового цилиндра (3):

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (3)$$

где  $r^2$  – радиус термореактора, м;

$h$  – высота заполнения термореактора, м.

С учетом формул (2) – (3) записываем выражение массы формулой (4):

$$m = \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (4)$$

Известно, что относительная или рабочая влажность ( $W_p$ ) любого материала определяется по следующей формуле (5) [13]:

$$W_p = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100 \quad (5)$$

где  $m$  – масса образца во влажном состоянии, г;

$m_0$  – масса того же образца, высушенного до постоянного значения, г.

Тогда массу образца во влажном состоянии можно определить по формуле (6):

$$m = \frac{(m - m_0) \cdot 100}{W_p} \quad (6)$$

Приравняем формулы (4) и (6), и выразим массу через влажность, плотность и объём:

$$m = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot W_p}{100} + m_0 \quad (7)$$

С учетом равенства (7) уравнение (1) примет вид формулы (8):

$$Q(m) = 0,16 \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \rho \cdot W_p}{100} + m_0 \right) \quad (8)$$

Таким образом, получена зависимость, описывающая процесс пиролиза и позволяющая рассчитывать требуемый расход энергии на перерабатываемую массу сырья с учетом его объёма и влажности.

Основываясь на предварительно полученной формуле (8), нами построен график зависимости требуемого количества энергии на утилизацию твёрдого отхода в зависимости от влажности сырья. Плотность пиролизного газа составляет 0,65–0,85 кг/м<sup>3</sup>. Радиус термореактора – 0,5 м, высота наполнения бесподстилочного твёрдого навоза в термореакторе – 0,3 м.

Анализируя полученную зависимость можно сделать вывод, что с повышением влажности сырья объём получаемой энергии снижается (рис. 2).

**Заключение.** Существующие математические модели, описывающие

процесс пиролиза носят аналитический характер и их практическое применение затруднительно. Они применимы для описания химических реакций, протекающих внутри пиролизной установки и разработаны для процесса пиролиза углеводородного сырья.

На наш взгляд, после необходимых модификаций, модель В. А. Глушкова, описывающую процесс утилизации растительного сырья, можно применить для описания процесса пиролиза твёрдого бесподстилочного навоза.

В результате, получена зависимость, описывающая процесс пиролиза для установки Глушкова, позволяющая рассчитывать требуемый расход энергии на перерабатываемую массу твёрдого бесподстилочного навоза с учетом его объёма и влажности. В формуле использован коэффициент пиролизации сырья (0,16) по В. А. Глушкову при установившейся температуре в термореакторе 3000 °С.

Основными факторами, при помощи которых обеспечивается управление процессом пиролиза являются:

- 1) влажность твёрдого навоза;
- 2) высота наполнения твёрдого навоза в термореакторе (соответственно, фактор заполнения термореактора и размеры фракции навоза);
- 3) радиус термореактора, то есть процесс пиролиза самого термореактора.

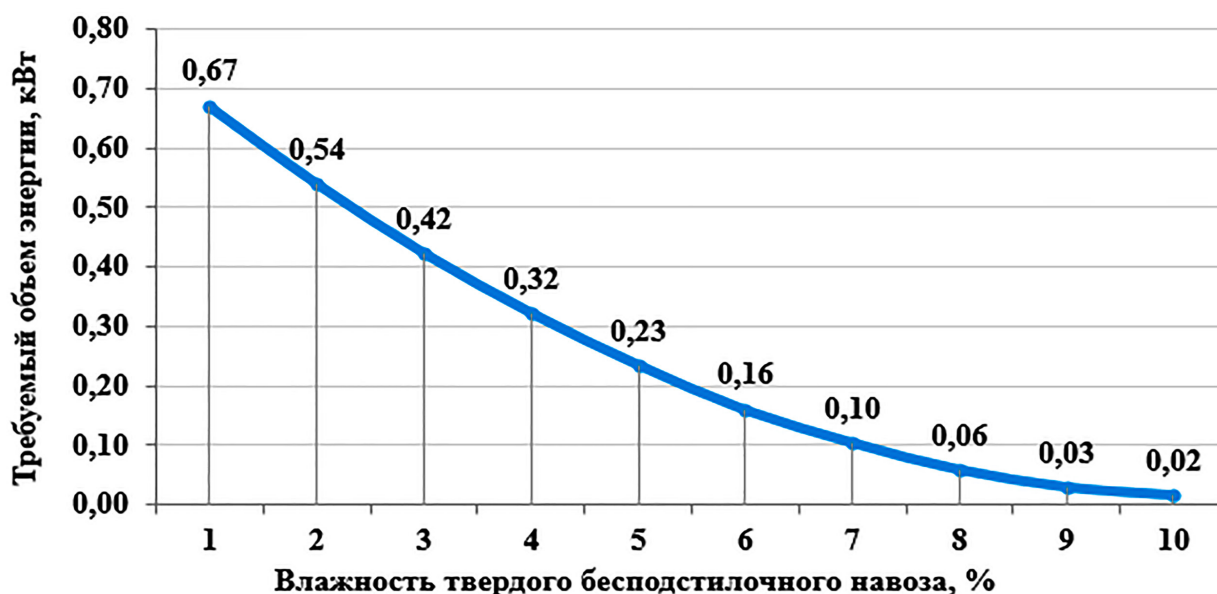


Рисунок 2 – График зависимости требуемого количества энергии на утилизацию твёрдого отхода в зависимости от влажности сырья

**Список источников**

1. Бакаев В. В. Моделирование систем управления сложными технологическими объектами на примере пиролизной установки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2002. 19 с.
2. Бондалетов В. Г. Комплексная переработка жидких продуктов пиролизных производств этилена и пропилена : автореф. дис. ... докт. техн. наук. Казань, 2014. 38 с.
3. Глушков В. А. Разработка и исследование автоматизированной установки пиролиза растительного сырья с целью повышения выхода топливного газа : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2006. 16 с.
4. Добровольский И. П., Васильев О. В. Перспективные методы очистки пиролизного газа от низкопроцентных токсичных примесей // Технические науки. 2012. № 5 (5). С. 77–80.
5. Евтеев В. К., Друзьянова В. П. Особенности механизации животноводства в Республике Саха (Якутия) // Актуальные проблемы АПК : материалы регион. науч.-практ. конф. (Иркутск, 4 октября 2001 г.). Иркутск : Иркутский государственный университет, 2001. С. 14–15.
6. Копытов В. В. Пиролиз и перспективы газификации твердых топлив // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2011. № 3 (8). С. 158.
7. Косивцов Ю. Ю. Низкотемпературный каталитический пиролиз органического сырья : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2011. 32 с.
8. Малыхин В. В. Математическое моделирование : учебное пособие. М. : Университет Российской академии образования, 1998. 160 с.
9. Мамедов З. А. Оптимизация безрециркуляционного процесса пиролиза этана с бутан-изобутиленовой фракцией в промышленной печи // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 1. С. 77–85.
10. Матвеев А. Н. Механика и теория относительности : учебник. М. : ОНИКС XXI век, 2003. 432 с.
11. Оптимальный позонный подвод топливного газа к змеевику этановой пиролизной печи / Т. Н. Шахтактинский, А. М. Алиев, А. З. Таиров [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2010. № 6 (44). С. 698–704.
12. Спиридонова А. В., Друзьянова В. П., Рожина М. Я. Обеспечение экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 84–88.
13. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия) : сайт. URL: <https://sakha.gks.ru> (дата обращения 01.02.2021).
14. Хафизов И. Ф., Мусин Р. Р. Современные тенденции развития процесса пиролиза // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 2. С. 231–234.

**References**

1. Bakaev V. V. Modelirovaniye sistem upravleniya slozhnymi tekhnologicheskimi ob"ektami na primere piroliznoy ustanovki [Modeling a control system for complex technological objects by the example of a pyrolysis plant]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Komsomol'sk-na-Amure, 2002, 19 p. (in Russ.).
2. Bondaletov V. G. Kompleksnaya pererabotka zhidkih produktov pirolznyh proizvodstv etilena i propilena [Complex processing of liquid products of ethylene and propylene pyrolysis units]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Kazan', 2014, 38 p. (in Russ.).
3. Glushkov V. A. Razrabotka i issledovanie avtomatizirovannoy ustanovki piroliza rastitel'nogo syr'ya s tsel'yu povysheniya vyhoda toplivnogo gaza : [Development and research of

an automated plant for pyrolysis of plant raw materials in order to increase the yield of fuel gas]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Izhevsk, 2006, 16 p. (in Russ.).

4. Dobrovol'skiy I. P., Vasil'ev O. V. Perspektivnye metody oчитки piroliznogo gaza ot nizkoprotsentnykh toksichnykh primesey [Promising methods for cleaning pyrolysis gas from low-percentage toxic impurities]. *Tekhnicheskie nauki. – Technical sciences*, 2012; № 5 (5): 77–80 (in Russ.).

5. Evteev V. K., Druzianova V. P. Osobennosti mekhanizatsii zhivotnovodstva v Respublike Sakha (Yakutiya) [Features of mechanization of animal husbandry in the Republic of Sakha (Yakutia)]. Proceedings from Actual problems of the agro-industrial complex: *Regional'naya nauchno-prakticheskaya konferenciya (4 oktyabrya 2001 g.) – Regional Scientific and Practical Conference*. (PP. 14–15), Irkutsk, 2001 (in Russ.).

6. Kopytov V. V. Piroliz i perspektivy gazifikatsii tverdykh topliv [Pyrolysis and Prospects for Gasification of Solid Fuels]. *Promyshlennyye i otopitel'nyye kotel'nyye i mini-TETS. – Industrial and heating boilers and mini-CHP*, 2011; 3 (8): 158 (in Russ.).

7. Kosivtsov Iu. Iu. Nizkotemperaturnyy kataliticheskii piroliz organicheskogo syr'ia [Low-temperature catalytic pyrolysis of organic raw materials]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Moskva, 2011, 32 p. (in Russ.).

8. Malyhin V. V. *Matematicheskoe modelirovanie: uchebnoe posobie [Mathematical modeling: textbook]*, Moskva, Universitet Rossijskoj akademii obrazovaniya, 1998, 160 p. (in Russ.).

9. Mamedov Z. A. Optimizatsiya bezretsirkulyatsionnogo protsessa piroliza etana s butan-izobutilenovoy fraktsiyei v promyshlennoy pechi [Optimization of recirculation-free pyrolysis of ethane with butane-isobutylene fraction in an industrial furnace]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Himicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya. – Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology*, 2018; 1: 77–85 (in Russ.).

10. Matveev A. N. *Mekhanika i teoriya otnositel'nosti: uchebnyy [Mechanics and theory of relativity: textbook]*, Moskva, ONIKS 21 vek, 2003, 432 p. (in Russ.).

11. Shahtahtinskiy T. N., Aliev A. M., Tairov A. Z., Guseynova A. M., Ismailov N. R. Optimal'nyy pozonnyy podvod toplivnogo gaza k zmeeviku etanovoy piroliznoy pechi [Optimal zone fuel gas supply to the coil of the ethane pyrolysis furnace]. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. – Theoretical foundations of chemical technology*, 2010; 6 (44): 698–704 (in Russ.).

12. Spiridonova A. V., Druz'yanova V. P., Rozhina M.Ya. Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti v sel'skohozyaystvennom proizvodstve [Ensuring environmental safety in agricultural production]. *Nauchno-tekhnicheskyy vestnik Povolzh'ya. – Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*, 2018; 11: 84–88 (in Russ.).

13. Territorial'nyy organ Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Respublike Saha (Yakutiya) [Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Republic of Sakha (Yakutia)]. *sakha.gks.ru* Retrieved from <https://sakha.gks.ru> (Accessed 1 February 2021) (in Russ.).

14. Hafizov I. F., Musin R. R. Sovremennyye tendentsii razvitiya protsessa piroliza [Modern trends in the development of the pyrolysis process]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – Bulletin of Kazan Technological University*, 2015; 2: 231–234 (in Russ.).

© Спиридонова А. В., Друзьянова В. П., 2021

Статья поступила в редакцию 12.10.2021; одобрена после рецензирования 20.11.2021; принята к публикации 08.12.2021.

The article was submitted 12.10.2021; approved after reviewing 20.11.2021; accepted for publication 08.12.2021.

**Информация об авторах**

**Спиридонова Анастасия Валериевна**, старший преподаватель кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, [Savadf0706@mail.ru](mailto:Savadf0706@mail.ru);

**Друзьянова Варвара Петровна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова; профессор Октемского филиала Арктического государственного агротехнологического университета, [druzvar@mail.ru](mailto:druzvar@mail.ru)

**Information about the authors**

**Anastasiya V. Spiridonova**, Senior Lecturer of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, [Savadf0706@mail.ru](mailto:Savadf0706@mail.ru);

**Varvara P. Druzianova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov; Professor of the Oktemsky Branch of the Arctic State Agrotechnological University, [druzvar@mail.ru](mailto:druzvar@mail.ru)