

Научная статья

УДК 621.362

EDN FFDXPJ

<https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-136-143>

**Пиролизная технология – основа
для создания автономной пироэлектрической станции**

**Жанна Григорьевна Сивцева¹, Варвара Петровна Друзьянова²,
Юлия Сергеевна Кулешова³, Надежда Ивановна Кондакова⁴**

¹ Якутский индустриально-педагогический колледж имени В. М. Членова
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия

^{2,3} Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия

⁴ Арктический государственный агротехнологический университет
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия

¹ jeannasivtseva@mail.ru, ² druzvar@mail.ru, ³ cyanmillia@gmail.com, ⁴ konadiv57@mail.ru

Аннотация. Развитие техники и технологий повлияло на социально-бытовой уклад жизни сельских жителей – меньше становится поселений, заготавливающих дрова и использующих печное отопление. Повсеместно жилье селян подключено к магистральным сетям отопления, производящим тепло на угольном, газовом, конденсатном или электрическом источниках. Однако человек становится более зависимым от таких благ, и в критических ситуациях может возникнуть опасность замерзания помещения в холодное время года. Аварийное отключение подачи тепла и электричества может привести к приостановке производства. Решением проблем может быть внедрение в селах автономных технологий, позволяющих из доступного сырья в виде отходов производства получать альтернативный источник энергии. Существуют различные способы производства альтернативного топлива – ветровая и солнечная энергетика, биогазовая и пиролизная технологии и другие. В каждом отдельном случае необходимо выявить наиболее подходящий способ, обосновать его технологически и экономически, подобрать цепочку надежного оборудования, теоретически и экспериментально подтвердить предложение и только после всего внедрить в производство. С учетом того, что в сельских поселениях образовался и хранится немалый объем отходов различного происхождения и, ввиду отсутствия в большинстве сел технологий по переработке и утилизации этих отходов, предпочтение следует отдавать технологиям, преобразующим отходы в альтернативное топливо без нанесения вреда экологии. В статье дается обоснование внедрения пиролизной технологии, рассмотрен вопрос о возможности применения автономной пироэлектрической станции для населения Нюрбинского района Республики Саха (Якутия).

Ключевые слова: пиролиз, пирогаз, пиролизная установка, утилизации сырья, автономная пироэлектрическая станция, пиролизная технология

Для цитирования: Сивцева Ж. Г., Друзьянова В. П., Кулешова Ю. С., Кондакова Н. И. Пиролизная технология – основа для создания автономной пироэлектрической станции // Дальневосточный аграрный вестник. 2024. Том 18. № 2. С. 136–143. <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-136-143>.

Original article

**Pyrolysis technology as a basis
for creating an autonomous pyroelectric power plant**

**Zhanna G. Sivtseva¹, Varvara P. Druzyanova²,
Yulia S. Kuleshova³, Nadezhda I. Kondakova⁴**

¹ Yakutsk Industrial and Pedagogical College named after V. M. Chlenov
Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

^{2,3} North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov
Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

⁴ Arctic State Agrotechnological University
Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

¹ jeannasivtseva@mail.ru, ² druzvar@mail.ru, ³ cyanmillia@gmail.com, ⁴ konadiv57@mail.ru

Abstract. The development of equipment and technology has made its contribution to the social and everyday life of modern rural residents. There are fewer settlements that collect firewood and heat their homes with stoves. Villagers' homes are connected to main heating networks that produce heat from coal, gas, condensate or electric sources. However, a person becomes more dependent on such benefits, there is a danger of freezing in the premises during the cold season. An emergency shutdown of the heat and electricity supply can lead to the suspension of production. The solution to the above problems may be the introduction of autonomous technologies in villages, which make it possible to obtain an alternative source of energy from available raw materials in the form of industrial waste. There are various ways to produce alternative fuels – wind and solar energy, biogas and pyrolysis technologies and others. In each individual case, it is necessary to identify the most suitable of the above types, justify it technologically and economically, select a chain of reliable equipment, theoretically and experimentally confirm the proposal put forward, and only after all, implement it into production. Considering that currently a considerable amount of waste of various origins has been generated and stored in rural settlements and due to the lack of technologies for processing and disposal of this waste in most villages, preference should be given to technologies that convert waste into alternative fuel without harming the environment. The article provides a justification for the introduction of pyrolysis technology, considers the possibility of using an autonomous pyroelectric station for the population of the Nyurbinsky district of the Republic of Sakha (Yakutia).

Keywords: pyrolysis, pyrolysis gas, pyrolysis unit, recycling raw materials, autonomous pyroelectric plant, pyrolysis technology

For citation: Sivtseva Zh. G., Druzyanova V. P., Kuleshova Yu. S., Kondakova N. I. Pyrolysis technology as a basis for creating an autonomous pyroelectric power plant. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2024;18;2:136–143. (in Russ.). <https://doi.org/10.22450/1999-6837-2024-18-2-136-143>.

Введение. По данным региональных информационных агентств, угрозы заморозки помещений и приостановки производства из-за аварийных ситуаций ежегодно возникают в Нюрбинском районе Республики Саха (Якутия). В этой связи рассматриваются различные технологии по производству альтернативных видов энергии [1–3]. Пиролизная технология по утилизации твердого отхода, разработанная В. А. Глушковым, является наиболее подходящей для создания автономной пироэлектрической линии [2–4].

Переработка твердых масс отходов позволит не только очистить окружающую среду, но и даст возможность жителям села сохранить свою продукцию – молоко, преобразовывая пирогаз в электрическую энергию. Соответственно, модульная автономная электростанция позволит не только решить проблему за-

мерзания помещений, но и исключит потери, связанные с простоями сельскохозяйственных предприятий [5–9].

В настоящее время разработаны ряд математических моделей, описывающих процесс пиролиза (рис. 1) [5, 10].

Цель исследований – обосновать внедрение пиролизной технологии и рассмотреть вопрос возможности применения автономной пироэлектрической станции для населения Нюрбинского района Республики Саха (Якутия).

Материалы и методы исследований. Поскольку мы преследуем цель преобразования энергии, заключенной в пирогазе, в электрическую энергию, нами разработана энергетическая модель пиролизной установки, подробно описанная в работе [4]. Для раскрытия предложенной энергетической модели составлена тепло-

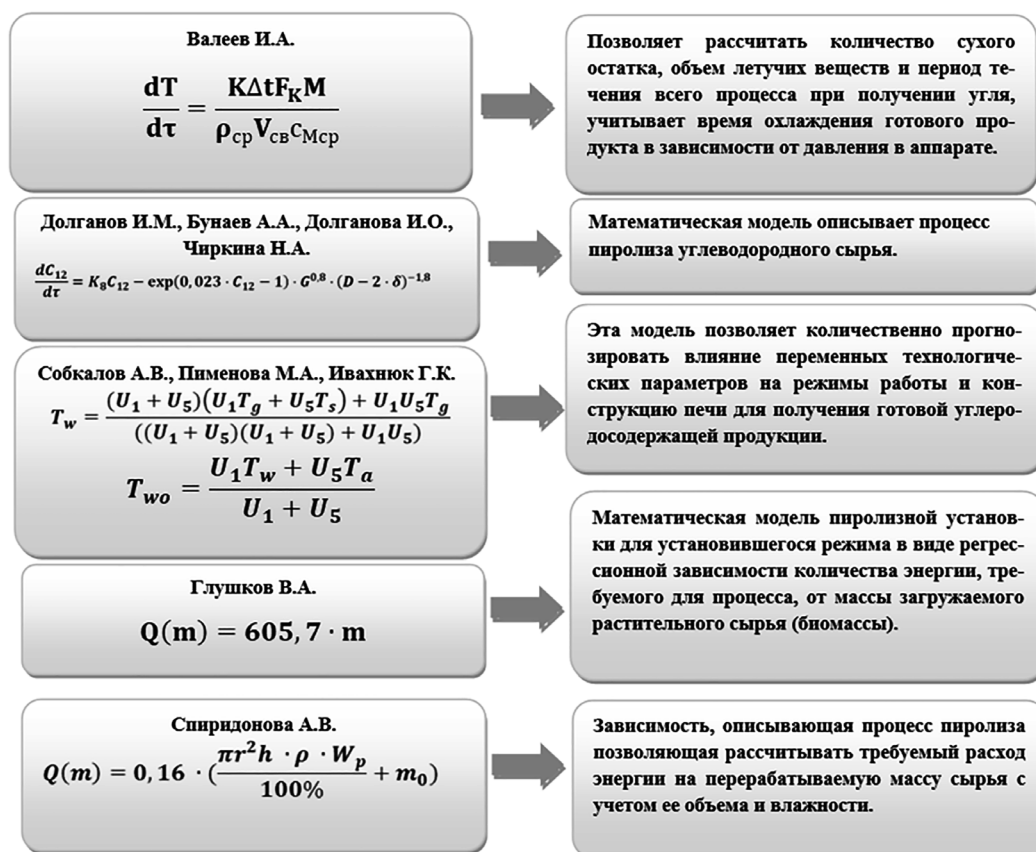


Рисунок 1 – Известные модели, описывающие процесс пиролиза

Figure 1 – Known models describing the pyrolysis process

техническая модель, учитывающая тепловые потоки, проходящие через пиролизную установку [4].

С учетом данных моделей, нами получена математическая зависимость, позволяющая определять количество производимой электрической энергии от объема пирогаза с учетом параметров окружающей среды [4]:

$$W_{эл.эн} = \frac{V_{п} c_{п} (T_{нагр} - T_{окр})}{3600 \cdot t} \quad (1)$$

где $W_{эл.эн}$ – количество вырабатываемой энергии, кВт·ч;

$V_{п}$ – объем пирогаза, м³;

$c_{п}$ – удельная теплоемкость пирогаза, кДж/К·м³;

$T_{нагр}$ – рабочая температура пиролиза, К;

$T_{окр}$ – температура окружающей среды, К.

Согласно формулы (1), ожидаемый объем электроэнергии из одного кубического метра опилок будет находиться в пределах от 0,033 до 0,1 кВт·ч. Следует отметить, что далее, с учетом результатов практических исследований, модель потребует коррекции в виде введения уточняющего коэффициента.

На первом этапе исследований проведены работы по выявлению и устранению неисправностей установки ГВА-1. Проведена модернизация пиролизной установки по направлениям, обозначенным в таблице 1.

На рисунке 2 показана пиролизная установка до и после модернизации.

В качестве сырья нами выбраны опилки, которых образуется достаточное количество в сельских поселениях Нюрбы. Согласно данным за 2022 г., в районе имеется 60 действующих пилорам и в год образуется более 7 тонн опилок и щепы.

Таблица 1 – Неисправности и пути модернизации пиролизной установки ГВА-1
Table 1 – Malfunctions and ways to modernize the pyrolysis plant GVA-1

Неисправность	Модернизация
Нестабильность работы: конденсат газа (вода) попадает обратно в термореактор, что приводит к остановке процесса	Стабильность процесса: установлен отстойник для удаления конденсата газа (воды) между термореактором и гидрозатвором
Проблемы с герметизацией: каждый раз необходимо перед загрузкой сырья очищать верхний обод термореактора от накопившегося и засохшего герметика; затем герметизировать крышку и ждать полного высыхания (24 ч и более); ненадежное крепление крышки термореактора; при нагреве крышки резьбы обычных болтов размягчились, произошел срыв крышки	Герметизация: герметик заменен на асбестовую (ленту) веревку; обычные резьбовые болты заменены на более надежные каленые болты
Электронные приборы показателей: отсутствуют независимые приборы для снятия текущих показателей	Автономность показателей: идет процесс установки механических манометров и термометров
Небезопасность: отсутствие клапана аварийного сброса излишнего давления от гидрозатвора и термореактора при длительном процессе пиролиза отхода; отсутствие автоматического выключателя электропитания ТЭН	Безопасность: установлен взрывной клапан в гидрозатворе; установлен клапан аварийного сброса давления газа; установлен автоматический выключатель электропитания, дифференциальный автомат



Рисунок 2 – Пиролизная установка ГВА-1 до модернизации (слева) и после модернизации (справа)
Figure 2 – Pyrolysis unit GVA-1 before modernization (left) and after modernization (right)

В качестве сырья были выбраны три вида древесных отходов: древесная щепа, опилки и опилки мелкие (пылевидные).

При пиролизации отходы должны иметь влажность, составляющую от 2 до 50 % [3]. В таблице 2 показаны параметры древесных отходов.

Нами собрана автономная пироэлектрическая станция, включающая следующие основные узлы: термореактор, гидрозатвор, газгольдер-компрессор, генератор гибридный газобензиновый модели СПЕЦ-HG-7000, прожектор светодиодный СДО-8.

Проведен анализ полученных объемов пирогаза (табл. 3).

Для применения пирогаза в качестве моторного топлива содержание метана в нем должно быть более 80 % [9, 10]. Как видно из таблицы 3, максимальное содержание оксида углерода имеет пирогаз от мелких опилок (0,2–0,9 мм) – 0,44 %. Также при утилизации пылевидных опилок обнаружено образование смолы, которая забивает патрубки установки. Поэтому предлагаем в качестве сырья использовать щепу (5–20 мм) и опилки (1–5 мм).

Результаты исследований и их обсуждение. Управляющими факторами процесса пиролизации являются влажность сырья и размеры его фракций.

Таблица 2 – Параметры древесных отходов

Table 2 – Wood waste parameters

Вид древесного отхода	Масса, г					Температура сушки, °С	Влажность, %
	с тарой влажная	влажная	тары	с тарой сухая	сухая		
Опилки, 1–5 мм	282,11–357,39	62,37–66,35	214,76–296,02	281,13–354,64	57,62–63,37	100	4,5–4,7
Опилки мелкие, 0,2–0,9 мм	282,04–321,88	52,20–98,26	224,62–227,84	94,65–267,96	39,09–318,27	100	2,7–3,7
Щепа, 5–20 мм	358,27–597,14	142,45–252,82	214,82–343,32	116,04–163,12	331,86–507,44	100	21,5–53,9

Таблица 3 – Результаты анализа пирогаза из различных видов отходов

Table 3 – Results of analysis of pyrolysis gas from different types of waste

В процентах (in percent)

Древесный отход, размер фракции	CO ₂	CH ₄	O ₂	Прочие газы
Щепа, 5–20 мм	0,28	90,36	0,00	0,00
Опилки, 1–5 мм	0,03	90,70	0,00	0,00
Опилки мелкие, 0,2–0,9 мм	0,44	90,20	0,00	0,00

Определены значения основных факторов, влияющих на эффективность процесса когенерационной технологии:

- 1) *влажность твердых отходов* – 4,5–4,6 %;
- 2) *размеры фракций сырья* – 1–5 мм;
- 3) *температура окружающей среды* – 20–21 °С;
- 4) *температура пиролиза* – 300 °С;
- 5) *содержание метана в пирогазе* – от 90 %;
- 6) *диаметр жиклера* – 3,5 см.

На основании результатов исследований, определен корректирующий коэффициент, равный 0,24. С учетом этого необходимо уточнить математическую модель процесса пиролиза с применением установки ГВА-1. Для этого при расчете количества вырабатываемой энергии по формуле (1) полученный результат необходимо умножить на 0,24.

После уточнения математической модели процесса пиролизации нами построен график сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований, показанный на рисунке 3.

Анализ полученного графика позволяет сделать вывод, что теоретические и практические результаты находятся в доверительных интервалах.

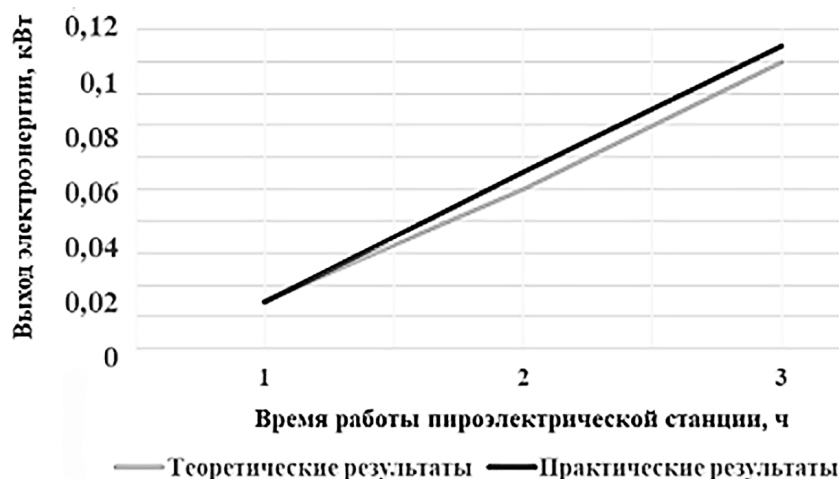


Рисунок 3 – Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований

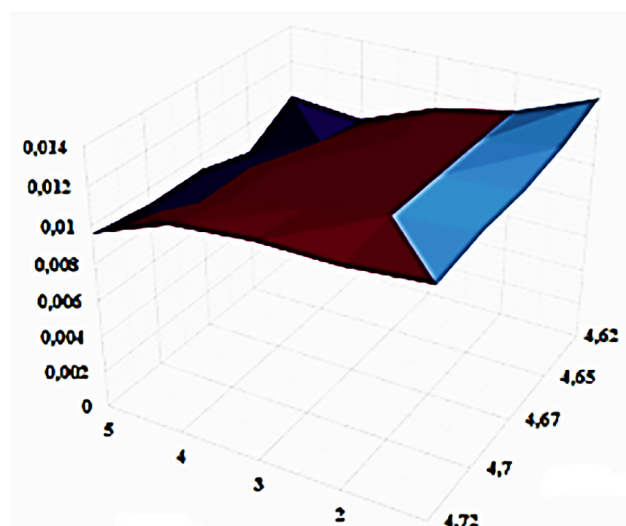
Figure 3 – Comparing the results of theoretical and experimental studies

Данные экспериментальных исследований были обработаны с помощью программы Statistica, в результате чего построена поверхность отклика, описывающая выход электрической энергии (рис. 6).

Эффективность пиролизной технологии рассчитана на примере Нюрбинского улуса. По плану Министерства сельского хозяйства Якутии, в год производство и

сдача молока составляет 420 т. Зная указанное значение, можно определить среднесуточный объем производства молока, с учетом которого при аварии электролинии произойдет утрата качества и порча молока стоимостью более 525 тыс. руб.

С использованием накопленного пиролизного газа, это молоко можно сохранить в холодильнике или переработать в



$$y = -0,12x_1^2 + 8,52x_2 - 0,48$$

по оси Ox_1 отложен показатель размера фракций, мм; по оси Ox_2 – показатель влажности, %; по оси Oy – выход электрической энергии, кВт·ч

Ox_1 – the fraction size indicator, mm; Ox_2 – the humidity indicator, %;

Oy – the output of electric energy, kWh

Рисунок 4 – Поверхность отклика, описывающая выход электрической энергии

Figure 4 – Response surface describing electrical energy output

какой-нибудь иной молочный продукт. При этом на работу пироэлектрической линии с устройством ГВА-1 за 8 часов работы расходуется 24 кВт·ч электроэнергии стоимостью 360 руб.

Заключение. В представленном научном исследовании обоснованы параметры автономной электрической станции:

из 1 кг опилок можно производить объем пирогаза, равный 0,09–0,1 м³;

установка ГВА-1 потребляет за час работы 3 кВт·ч электроэнергии; тогда за один полный цикл работы потребление электроэнергии установкой будет составлять 9,75 кВт·ч;

стоимость одного киловатт-часа пиролизной электроэнергии равна 15 руб.;

стоимость автономной электрической станции составляет 446 955 руб.

Список источников

1. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: теория и практика. М. : Колос, 1982. 148 с.
2. Баротфи И., Рафаи П. Энергосберегающие технологии и агрегаты на животноводческих фермах. М. : Агропромиздат, 1988. 227 с.
3. Глушков В. А., Тарануха В. П., Печенкин А. Ю., Русяк И. Г. Технологические режимы получения энергоносителей путем переработки биомассы. Ижевск : Ижевский государственный технический университет, 2011. 112 с. EDN XUZFRT.
4. Друзьянова В. П., Сивцева Ж. Г. Создание пироэлектрической линии для электро-снабжения аграрного сектора на примере Нюрбинского улуса Республики Саха (Якутия) // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы всерос. науч.-практ. конф. Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2023. С. 72–79. EDN WPIQRP.
5. Глушков В. А., Ушаков Н. А. Математическая модель установки пиролиза растительного сырья с возвратом пиролизных смол. Ижевск : Ижевский государственный технический университет, 2006. 19 с. EDN PKCTPD.
6. Аникин Е. В. Пиролизная установка по переработке резинотехнических отходов с минимальным вредом окружающей среде // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 110. С. 1273–1282. EDN UHSETV.
7. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Электроэнергия из биогаза // Актуальные вопросы аграрной науки. 2020. № 34. С. 27–37. EDN WWUGEE.
8. Спиридонова А. В., Друзьянова В. П. Пиролизная технология в животноводстве // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 2 (58). С. 152–159. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-2-152-159>.

References

1. Baader V., Done E., Brändenderfer M. *Biogas: theory and practice*, Moscow, Kolos, 1982, 148 p. (in Russ.).
2. Barotfi I., Rafai P. *Energy-saving technologies and units on livestock farms*, Moscow, Agropromizdat, 1988, 227 p. (in Russ.).
3. Glushkov V. A., Taranukha V. P., Pechenkin A. Yu., Rusyak I. G. *Technological modes for obtaining energy resources through processing biomass*, Izhevsk, Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2011, 112 p. EDN XUZFRT (in Russ.).
4. Druzyanova V. P., Sivtseva Zh. G. Creation of a pyroelectric line for the power supply of the agricultural sector on the example of the Nyurbinsky ulus of the Republic of Sakha (Yakutia). Proceedings from Agro-industrial complex: problems and development prospects: *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. (PP. 72–79), Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet, 2023. EDN WPIQRP (in Russ.).
5. Glushkov V. A., Ushakov N. A. *Mathematical model of plant raw material pyrolysis installation with return of pyrolysis resins*, Izhevsk, Izhevskiy gosudarstvennyy tekhnicheskij universitet, 2006, 19 p. EDN PKCTPD (in Russ.).

6. Anikin E. V. Pyrolysis plant for processing rubber waste with minimal harm to the environment. *Politematicheskiiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015;110:1273–1282. EDN UHSETV (in Russ.).

7. Savvateeva I. A., Druzyanova V. P. Electricity from biogas. *Aktual'nye voprosy agrarnoy nauki*, 2020;34:27–37. EDN WWUGEE (in Russ.).

8. Spiridonova A. V., Druzyanova V. P. Pyrolysis technology in animal husbandry. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*, 2021;2(58):152–159. <https://doi.org/10.24412/1999-6837-2021-2-152-159> (in Russ.).

© Сивцева Ж. Г., Друзьянова В. П., Кулешова Ю. С., Кондакова Н. И., 2024

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; одобрена после рецензирования 01.06.2024; принята к публикации 10.06.2024.

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 01.06.2024; accepted for publication 10.06.2024.

Информация об авторах

Сивцева Жанна Григорьевна, преподаватель, Якутский индустриально-педагогический колледж имени М. В. Членова, jeannasivtseva@mail.ru;

Друзьянова Варвара Петровна, доктор технических наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, druzvar@mail.ru;

Кулешова Юлия Сергеевна, студент, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, cyanmillia@gmail.com;

Кондакова Надежда Ивановна, старший преподаватель, Арктический государственный агротехнологический университет, konadiv57@mail.ru

Information about the authors

Zhanna G. Sivtseva, Lecturer, Yakutsk Industrial and Pedagogical College named after V. M. Chlenov, jeannasivtseva@mail.ru;

Varvara P. Druzyanova, Doctor of Technical Sciences, Professor, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, druzvar@mail.ru;

Yulia S. Kuleshova, Undergraduate Student, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, cyanmillia@gmail.com;

Nadezhda I. Kondakova, Senior Lecturer, Arctic State Agrotechnological University, konadiv57@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.