

Научная статья

УДК 621

EDN PNYLCE

DOI: 10.22450/19996837_2022_2_116

Когенерационная линия по преобразованию биогаза в электрическую энергию

Евсей Евсеевич Анисимов¹, Николай Вадимович Петров²,
Ирина Аркадьевна Савватеева³, Любовь Николаевна Дьячковская⁴

^{1, 2, 3} Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия

⁴ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
Республика Бурятия, Улан-Удэ, Россия

¹ evsei_mexx@mail.ru, ² petnikvad1988@mail.ru,

³ karinushka_nv25@mail.ru, ⁴ Loveis-art@mail.ru

Аннотация. В настоящее время основной формой хозяйствования в животноводческой отрасли Якутии являются частные (семейные) фермы. В одном хозяйстве в среднем содержится до 20 голов крупного рогатого скота. Следует отметить, что помещения для содержания скота сооружаются без учета принятых нормативных требований, что затрудняет и исключает возможность установки серийно выпускаемого промышленностью оборудования по механизации и автоматизации трудоёмких процессов. Ввиду того, что животноводческие фермы локализованы в населённых пунктах, существует острая проблема нехватки или отсутствия пастбищ. Соответственно, удои молока ощутимо снижаются. Повышения производства молока можно добиться увеличением количества летних ферм. А проблему нехватки пастбищ можно решить путём вывода коров на высоко травянистые угодья, расположенные на заброшенных децентрализованных землях. Для организации летних ферм на децентрализованных землях необходимо внедрять технологии, позволяющие производить энергию от альтернативного источника – ветровых установок, гидро- или дизельных станций, биогазовых или пиролизных линий. В условиях Якутии наиболее доступным, менее затратным станет сооружение когенерационных линий на основе биогазовой технологии. В биогазовой установке навоз животных в анаэробных условиях перерабатывается в органическое удобрение с попутным образованием биогаза – источника энергии. Полученный биогаз очищается от влаги и подаётся в газовый генератор, где преобразуется в электрическую энергию. Таким образом, внедряя когенерационную линию на основе биогазовой технологии, фермер сможет организовать независимое автономное энергосберегающее и безотходное производство на децентрализованном участке.

Ключевые слова: навоз, анаэробный процесс, биогазовые технологии, биогаз, накопительный процесс, когенерация, психрофильный режим, биоэнергетические установки, летние фермы, электрическая энергия, процесс удоя молока

Для цитирования: Анисимов Е. Е., Петров Н. В., Савватеева И. А., Дьячковская Л. Н. Когенерационная линия по преобразованию биогаза в электрическую энергию // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Вып. 2 (62). С. 116–123. doi: 10.22450/19996837_2022_2_116.

Original article

Cogeneration line for converting biogas into electrical energy

Evsei E. Anisimov¹, Nikolay V. Petrov²,
Irina A. Savvateeva³, Lyubov N. Dyachkovskaya⁴

^{1, 2, 3} North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov,

Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

⁴ East Siberian State University of Technology and Management,
Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Russia

¹ evsei_mexx@mail.ru, ² petnikvad1988@mail.ru,

³ karinushka_nv25@mail.ru, ⁴ Loveis-art@mail.ru

Abstract. Currently, the main form of management in the livestock industry of Yakutia are private (family) farms. On average, one farm contains up to 20 heads of cattle. It should be noted that the premises for keeping livestock are constructed without taking into account the accepted regulatory requirements, which makes it difficult and excludes the possibility of installing mass-produced industrial equipment for mechanization and automation of labor-intensive processes. Due to the fact that livestock farms are localized in settlements, there is an acute problem of shortage or lack of pastures. Accordingly, milk yields are significantly reduced. An increase in milk production can be achieved by increasing the number of summer farms. And the problem of lack of pastures can be solved by bringing cows to highly grassy areas located on abandoned decentralized lands. To organize summer farms on decentralized lands, it is necessary to introduce technologies that allow producing energy from an alternative source – wind turbines, hydro or diesel stations, biogas or pyrolysis lines. In the conditions of Yakutia, the construction of cogeneration lines based on biogas technology will be the most affordable and less expensive. In a biogas plant, animal manure under anaerobic conditions is processed into organic fertilizer with the associated formation of biogas – an energy source. The resulting biogas is purified from moisture and fed into a gas generator, where it is converted into electrical energy. Thus, by introducing a cogeneration line based on biogas technology, the farmer will be able to organize independent autonomous energy-saving and waste-free production on a decentralized site.

Keywords: manure, anaerobic process, biogas technologies, biogas, accumulation process, cogeneration, psychrophilic mode, bioenergy plants, summer farms, electric energy, milk production process

For citation: Anisimov E. E., Petrov N. V., Savvateeva I. A., Dyachkovskaya L. N. Kogeneratsionnaya liniya po preobrazovaniyu biogaza v elektricheskuyu energiyu [Cogeneration line for converting biogas into electrical energy]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik. – Far Eastern Agrarian Bulletin.* 2022; 2 (62): 116–123 (in Russ.). doi: 10.22450/19996837_2022_2_116.

По данным министерства сельского хозяйства Республики Саха (Якутия), за период 2014–2020 гг. земли сельскохозяйственного назначения от общего земельного фонда республики составили 6,31 % (19 446,4 тыс. га) [1]. При этом эффективность использования данных земель носит регрессивный характер. Это связано с климатическими особенностями региона, а также с отсутствием линий электропередач на территориях с высокой травянистой растительностью.

Добиться повышения удоев коров можно путём вывода их в тёплое время года на летние фермы (сайбыльки). Одна-

ко, отсутствие линий электропередач на территориях с высокой травянистой растительностью ограничивает организацию летних ферм. Данную проблему можно решить внедрением технологии когенерации биогаза в электрическую энергию, которая заключается в переработке навоза с получением органических удобрений и преобразовании биогаза в электричество. Таким образом, можно создать автономное энергонезависимое производство.

Для территории Республики Саха (Якутия) июнь – сентябрь являются максимально эффективными по количеству удоя, так как в этот период коровы вскарм-

ливаются свежей травой, получают возможность потреблять воду из озёр в необходимом количестве. Летнее пастбищное содержание животных также весьма положительно влияет на состояние их здоровья, способствует формированию запасов жизненно важных питательных веществ. На выпасе крупный рогатый скот испытывает благотворное воздействие солнечных лучей, чистого воздуха, активного движения.

В настоящее время, из-за отсутствия линий электропередачи на территориях с высокой травяной растительностью, под организацию летних ферм попадают одни и те же сельскохозяйственные угодья, где имеется доступное электроснабжение. Это приводит к истощению пастбищ, на бедных северных почвах не обеспечивается воспроизводство растительности. Из года в год животные утаптывают почву, оказывая разрушающее воздействие [3]. А сеяные пастбища требуют дополнительных финансовых, трудовых затрат.

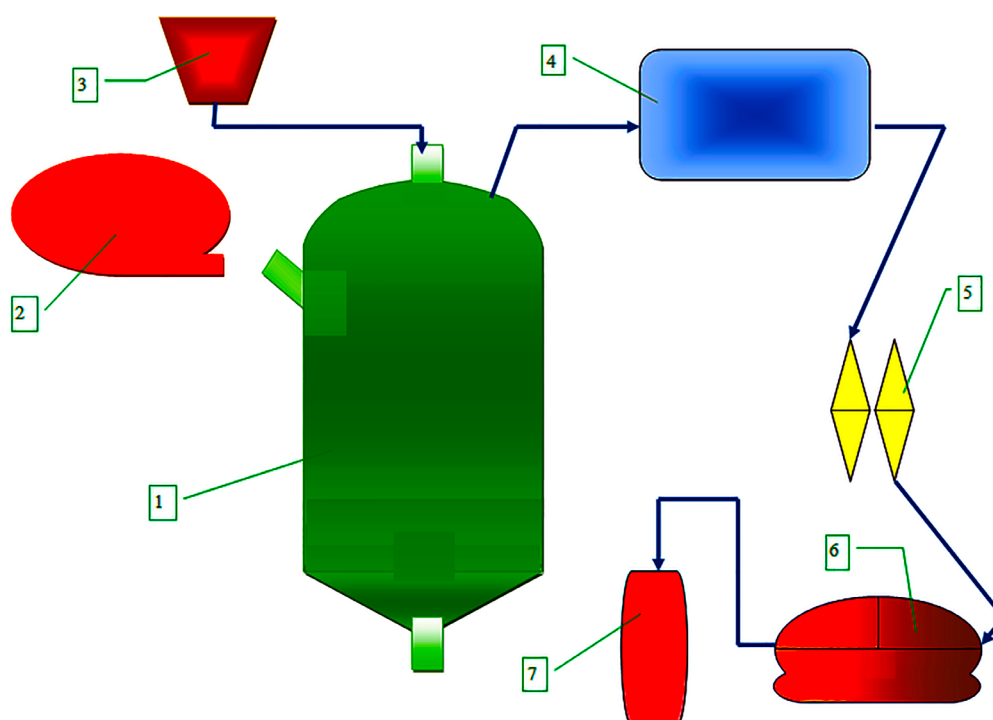
Нами разработана и апробирована технология, позволяющая решить вопрос освоения дальних и заброшенных децентрализованных земель для вовлечения их в использование под летние фермы.

Основой когенерационной линии по преобразованию биогаза в электрическую энергию предлагается использовать энергосберегающую технологию, разработанную В. П. Друзяновой [2, 3, 6, 7] в накопительном психрофильном режиме работы биоэнергетической установки (рис.1).

Эта технология отличается от существующих следующим:

1) работает в психрофильном режиме (без подогрева, при температуре окружающей среды);

2) объём метантенка составляет один кубический метр, что позволяет упростить конструкцию установки, ускорить процессы разложения навоза и производства биогаза;



1 – метантенк; 2 – ёмкость для гомогенизации свежего навоза с водой;
3 – адаптационная установка; 4 – сухой газгольдер; 5 – фильтр для очистки биогаза;
6 – компрессор высокого давления; 7 – газовый баллон

Рисунок 1 – Принципиальная схема энергосберегающей технологии для анаэробной переработки бесподстильного навоза крупного рогатого скота в накопительном психрофильном режиме работы биоэнергетической установки

3) обеспечивает модульное производство, постепенно увеличивая количество метантенков.

Исследованиями отечественных и зарубежных учёных доказано, что в психрофильном режиме получается наиболее качественный биогаз, содержащий высокий процент горючего метана.

Для сооружения когенерационной линии по преобразованию биогаза в электрическую энергию проведены три этапа исследований.

Первый этап. Выполнены натурные эксперименты на накопительной психрофильной линии для уточнения значений управляющих факторов, обеспечивающих оптимальный режим работы биоэнергетической установки (рис. 2).

Через загрузочный патрубок (2) поступает субстрат влажностью 90–93 % объёмом две трети от общего объёма метантенка (1). Необходимая влажность навоза, загружаемого в метантенк, достигается путём смешивания навоза с тёплой водой (при температуре от 30 до 40 °С).

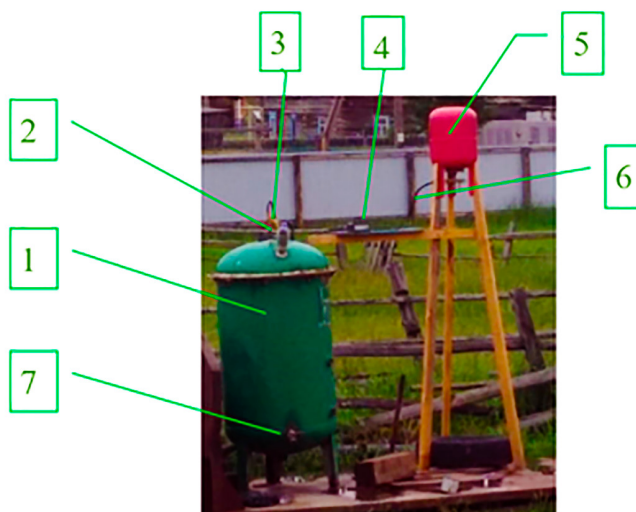
При этом для достижения влажности 90 % необходимый расход воды составляет 50 литров на 100 кг навоза; для достижения влажности 92 % – 87,5; для достижения влажности 94 % – 150; для достижения влажности 96 % – 275; для достижения влажности 98 % – 350 литров на 100 кг навоза.

После загрузки сырья в метантенк (1) проверяется герметичность газовых труб. При помощи компрессора забирается воздух с метантенка через газовый патрубок, создаются анаэробные условия. Из метантенка биогаз проходит по гибким газовым трубам (6) и накапливается в газгольдер-компрессоре (5). Качество биогаза на содержание метана проверяется газоанализатором «Автотест-01.03М».

Второй этап. Обоснование оптимальных факторов, обеспечивающих стабильную работу газового генератора при преобразовании биогаза в электрическую энергию (рис. 3).

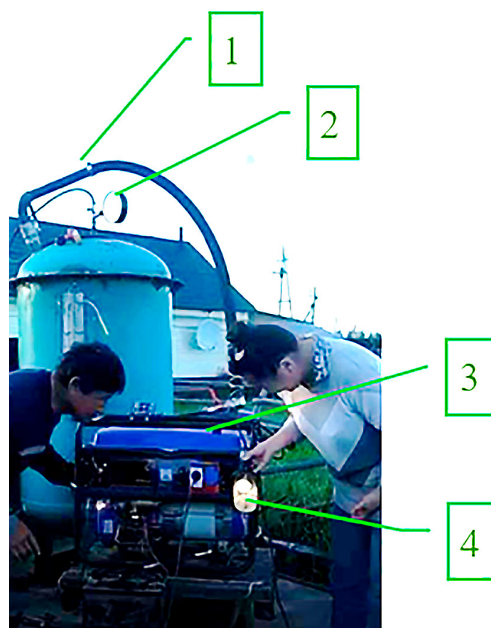
После получения горючего биогаза и накопления его достаточного объёма, подбираются значения давления биогаза в газгольдер-компрессоре и диаметр жиклера генератора (3). Биогаз через счётчик газа и датчик давления (2) попадает в камеру сгорания генератора (3) и преобразуется в электрическую энергию. Полученная энергия запускает в работу потребителя энергии (в данном случае электрическую лампочку (4)). Путём варьирования подбирается размер диаметра жиклера для подачи биогазового топлива в камеру сгорания генератора.

Третий этап. Получение результатов опытов и имитационное моделирование.



1 – метантенк объёмом один кубический метр; 2 – патрубок для загрузки; 3 – датчик давления; 4 – счётчик газа; 5 – газгольдер-компрессор; 6 – газовые трубы; 7 – разгрузочный патрубок

Рисунок 2 – Общий вид накопительной психрофильной линии



1 – метантенк объёмом один кубический метр; 2 – датчик давления;
3 – газовый генератор марки «СПЕЦ» модель SG-6500E; 4 – электрическая лампа (40 ватт)

Рисунок 3 – Общий вид пилотной линии по когенерации биогаза в электрическую энергию

Четвертый этап. Разработка электронной схемы процесса когенерации биогаза в электрическую энергию.

В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований принята следующая технологическая схема для сооружения когенерационной линии по преобразованию биогаза в электрическую энергию (рис. 4).

В летних фермах основным потребителем электрической энергии являются доильные установки, для которых требуемая максимальная мощность равная пяти киловатт. В этой связи, рекомендуем использовать газогенераторы мощностью от трёх до пяти киловатт.

В пилотной когенерационной линии нами применён генератор SG-6500E. По паспортным данным, для работы этого генератора для преобразования в электроэнергию требуется один кубический метр газа на один час работы.

Биогаз эквивалентен природному газу в соотношении (1:0,6). Следовательно, для бесперебойной работы генератора необходимо $1,4 \text{ м}^3$ биогаза. Приняв время дойки за два часа, определили, что в компрессоре-газгольдере необходим объём до трёх кубических метров биогаза.

С учётом проведённых исследований, *управляющими факторами для обеспечения эффективной работы когенерационной линии являются:*

1. Влажность сбраживаемого навоза от 90 до 93 %.

2. Температура окружающего воздуха: дневная – от 18 до 20 °С; ночная – от 10 до 12 °С.

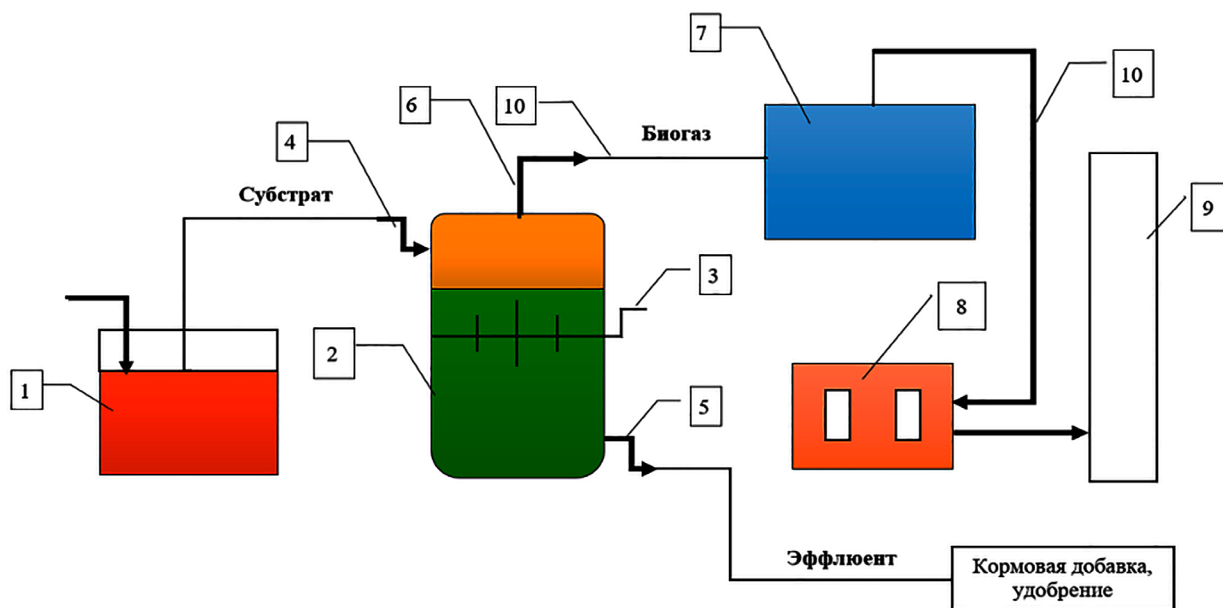
3. Период сбраживания сырья составляет от трёх до четырёх недель.

4. Диаметр жиклера в генераторе равен 40 миллиметров.

5. Объём метана (CH_4) в биогазе находится в пределах 92–94 %.

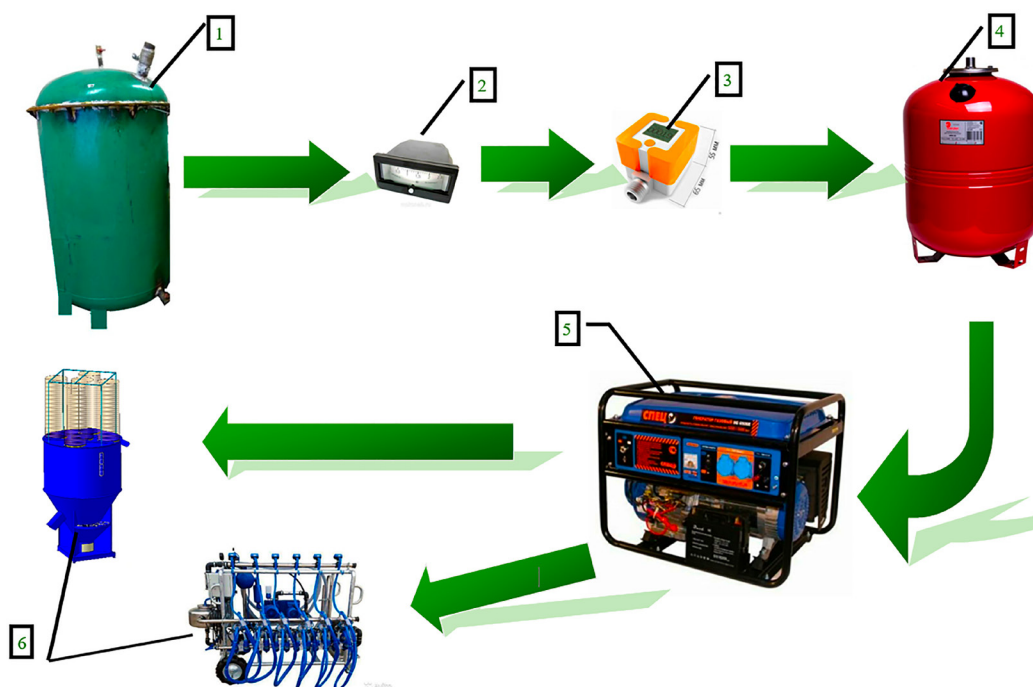
6. Давление в газгольдер-компрессоре составляет 3,2–4,5 килопаскаль.

Экономическая эффективность разработанной технологии по преобразованию биогаза в электрическую энергию была обоснована исследованиями, изложенными в предыдущих работах [6, 7]. Чем больше биогаза производится, тем больше повышается вероятность применения машин и аппаратов для механизации трудоёмких процессов на летних фермах, организуемых на децентрализованных сельскохозяйственных угодьях.



- 1 – ёмкость исходного сырья; 2 – метатенк; 3 – ручная мешалка; 4 – загрузочное устройство;
- 5 – выгрузное устройство; 6 – выход биогаза; 7 – газгольдер-компрессор;
- 8 – газовый генератор марки «СПЕЦ» модель SG-6500E;
- 9 – потребители энергии (доильный аппарат; кормосмеситель); 10 – газовые трубы

Рисунок 4 – Технологическая схема когенерационной линии по преобразованию биогаза в электрическую энергию



- 1 – метантенк объёмом один кубический метр; 2 – датчик давления; 3 – счётчик газа;
- 4 – газгольдер-компрессор; 5 – газовый генератор марки «СПЕЦ» модель SG-6500E;
- 6 – потребители энергии

Рисунок 5 – Когенерационная линия

Для механизации процессов доения и подготовки кормов к вскармливанию предлагается внедрить в летние фермы когенерационную технологию, включающую следующий перечень оборудования (рис. 5):

1) два метантенка объёмом по одному кубическому метру каждый;

2) два газгольдер-компрессора объёмом по 50 литров каждый;

3) газовый генератор марки SG-6500E.

Фермер, в зависимости от своих финансовых средств, имеет возможность наращивать производство биогаза на основе увеличения количества метантенков, то есть применяя модульный способ.

Список источников

1. Гура Б. Производство биогаза из жидкого и твёрдого навоза на сельхозпредприятиях. Варшава : Центральная библиотека, 1987. 110 с.

2. Друзьянова В. П. Ресурсосберегающая технология утилизации бесподстилочного навоза крупного рогатого скота в условиях Республики Саха (Якутия) : дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2004. 161 с.

3. Друзьянова В. П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота : автореф. дис. ... докт. техн. наук. Улан-Удэ, 2015. 22 с.

4. Егорова Е. Н. Обоснование параметров метантенка малого объёма с перемешивающим устройством для условий Республики Саха (Якутия) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Благовещенск, 2017. 20 с.

5. Петров Н. В. Обеспечение работоспособности бензиновых двигателей внутреннего сгорания сельскохозяйственной техники при переводе на биогаз корректированием регулировочных параметров двигателя : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2013. 20 с.

6. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Математическая зависимость процесса когенерации биогаза в электрическую энергию при психрофильном режиме // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 4 (60). С. 182–190.

7. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Технология производства электроэнергии из биогаза, получаемого от навоза крупного рогатого скота // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 2 (58). С. 144–151.

8. Состав и питательность кормов (союзные республики, экономические районы РСФСР) : справочник / под ред. И. С. Шумилина. М. : Агропромиздат, 1986. 303 с.

References

1. Gura B. *Proizvodstvo biogaza iz zhidkogo i tverdogo navoza na sel'hozpredpriyatijah* [Production of biogas from liquid and solid manure at agricultural enterprises], Varshava, Central'naya biblioteka, 1987, 110 p. (in Russ.).

2. Druz'janova V. P. Resursosberegajushhaja tehnologija utilizacii bespodstilochnogo navoza krupnogo rogatogo skota v uslovijah Respubliki Saxa (Jakutija) [Resource-saving technology for utilization of bedless cattle manure in the conditions of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Candidate's thesis*. Irkutsk, 2004, 161 p. (in Russ.).

3. Druz'janova V. P. Energosberegajushhaja tehnologija pererabotki navoza krupnogo rogatogo skota [Energy-saving technology for processing cattle manure]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Ulan-Udje, 2015, 22 p. (in Russ.).

4. Egorova E. N. Obosnovanie parametrov metantenka malogo ob'ema s peremeshivajushhim ustrojstvom dlja uslovij Respubliki Saha (Jakutija) [Substantiation of the parameters of a small digester with a mixing device for the conditions of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Blagoveshhensk, 2017, 20 p. (in Russ.).

5. Petrov N. V. Obespechenie rabotosposobnosti benzinovyh dvigatelej vnutrennego sgoranija sel'skhozjajstvennoj tehniki pri perevode na biogaz korrekcirovaniem regulirovochnyh parametrov dvigatelja [Ensuring of the operability of gasoline internal combustion engines of

agricultural machinery when converting to biogas by adjusting the regulated parameters of the engines]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Ulan-Udje, 2013, 20 p. (in Russ.).

6. Savvateeva I. A., Druz'janova V. P. Matematicheskaja zavisimost' processa kogeneracii biogaza v jelektricheskuju jenergiju pri psihrofil'nom rezhime [Mathematical dependence of cogeneration process of biogas into electrical energy in psychrophilic regime]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. – *Far Eastern Agrarian Herald*, 2021; 4 (60): 182–190 (in Russ.).

7. Savvateeva I. A., Druz'janova V. P. Tehnologija proizvodstva jelektrojenergii iz biogaza, poluchaemogo ot navoza krupnogo rogatogo skota [Technology of electricity production from biogas obtained from cattle manure]. *Dal'nevostochnyj agrarnyj vestnik*. – *Far Eastern Agrarian Herald*, 2021; 2 (58): 144–151 (in Russ.).

8. Shumilin I. S. (Eds.). *Sostav i pitatel'nost' kormov (sojuznye respubliki, jekonomicheskie rajony RSFSR): spravochnik [Composition and nutritional value of feed (union republics, economic regions of the RSFSR): guide]*, Moskva, Agropromizdat, 1986, 303 p. (in Russ.).

© Анисимов Е. Е., Петров Н. В., Савватеева И. А., Дьячковская Л. Н., 2022

Статья поступила в редакцию 01.04.2022; одобрена после рецензирования 05.05.2022; принята к публикации 24.05.2022.

The article was submitted 01.04.2022; approved after reviewing 05.05.2022; accepted for publication 24.05.2022.

Информация об авторах

Анисимов Евсей Евсеевич, старший преподаватель, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, evsei_mexx@mail.ru;

Петров Николай Вадимович, кандидат технических наук, доцент, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, petnikvad1988@mail.ru;

Савватеева Ирина Аркадьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, karinushka_nv25@mail.ru;

Дьячковская Любовь Николаевна, аспирант, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Loveis-art@mail.ru

Information about authors

Evsei E. Anisimov, Senior Lecturer, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, evsei_mexx@mail.ru;

Nikolay V. Petrov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, petnikvad1988@mail.ru;

Irina A. Savvateeva, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, karinushka_nv25@mail.ru;

Lubov N. Dyachkovskaya, Postgraduate Student, East Siberian State University of Technology and Management, Loveis-art@mail.ru