

УДК 662.7

DOI: 10.24412/1999-6837-2022-1-111-118

**Психрофильная накопительная биогазовая технология –
основа для производства электрической энергии на животноводческих фермах**

**Варвара Петровна Друзьянова¹, Ирина Аркадьевна Савватеева²,
Константин Константинович Горохов³, Анатолий Михайлович Бондаренко⁴**

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

¹ Октемский филиал Арктического государственного агротехнологического университета,
Республика Саха (Якутия), Октемцы, Россия

³ Арктический государственный агротехнологический университет,
Республика Саха (Якутия), Якутск, Россия

⁴ Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного
аграрного университета, Ростовская область, Зерноград, Россия

¹ druzvar@mail.ru, ² karinushka_nv25@mail.ru, ³ alaas_gorokhov@mail.ru,

⁴ bondanmih@rambler.ru

Аннотация. В конце XX в. в ходе аграрной реформы в Республике Саха (Якутия) произошли глубокие организационно-структурные и социально-экономические изменения. В настоящее время созданы основы многоукладной экономики сельского хозяйства, сформирован широкий круг сельскохозяйственных товаропроизводителей, отличающихся многообразием форм собственности и хозяйствования, осуществлены земельные преобразования. Одной из острых проблем является физический и моральный износ парка сельскохозяйственной техники. Из года в год ухудшается обеспеченность машинами и агрегатами по механизации трудоёмких процессов. В аграрном секторе республики в количественном отношении доля сельскохозяйственных предприятий, имеющих государственную форму собственности, составляет 0,4 %, а на частные предприятия приходится 99,6 %. При этом подавляющее большинство частных хозяйств осуществляют трудоёмкий процесс вручную. В связи с тем, что в последние годы ужесточились требования к качеству молока, перерабатывающие предприятия принимают молоко, полученное только машинным способом. Соответственно, количество ферм уменьшилось, снизились удои молока. Повысить удои можно путём организации летних ферм на децентрализованных сельскохозяйственных угодьях. Для создания таких ферм необходимо внедрять технологию анаэробного сбраживания навоза коров в биоэнергетических установках с преобразованием получаемого биогаза в электрическую энергию. В этом направлении существуют различные технологии. Для применения в условиях децентрализованной местности обосновано использование психрофильной накопительной технологии. Она устойчиво работает при температуре окружающего воздуха от 5 °С и выше, имеет малообъёмный метантенк до одного кубического метра, что делает её доступной в приобретении и простой в обслуживании и эксплуатации. При этом проводимый биогаз накапливается в газгольдере-компрессоре и через генератор преобразуется в электрическую энергию.

Ключевые слова: навоз, анаэробный процесс, биогазовые технологии, накопительный процесс, когенерация, психрофильный режим, летние фермы, электрическая энергия

Для цитирования: Психрофильная накопительная биогазовая технология – основа для производства электрической энергии на животноводческих фермах / В. П. Друзьянова, И. А. Савватеева, К. К. Горохов, А. М. Бондаренко // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. Вып. 1 (61). С. 111–118. doi: 10.24412/1999-6837-2022-1-111-118.

**Psychrophilic storage biogas technology –
the basis for the production of electrical energy on livestock farms**

**Varvara P. Druz'yanova¹, Irina A. Savvateeva²,
Konstantin K. Gorokhov³, Anatoly M. Bondarenko⁴**

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

Republik of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

¹ Arctic State Agrotechnological University – Oktemsky Branch,

Republik of Sakha (Yakutia), Oktemtsy, Russia

³ Arctic State Agrotechnological University, Republik of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia

⁴ Don State Agrarian University – Azov Black Sea Engineering Institute,

Rostov region, Zernograd, Russia

¹ druzvar@mail.ru, ² karinushka_nv25@mail.ru, ³ alaas_gorokhov@mail.ru,

⁴ bondanmih@rambler.ru

Abstract. At the end of the XX century, during the agrarian reform in the Republic of Sakha (Yakutia), deep organizational, structural and socio-economic changes took place. At present, the foundations of a multi-layered agricultural economy have been created, a wide range of agricultural producers, distinguished by a variety of forms of ownership and management, have been formed, land transformations have been carried out. One of the acute problems is the physical and moral deterioration of the agricultural machinery fleet. From year to year, the availability of machines and aggregates for the mechanization of labor-intensive processes is deteriorating. In the agricultural sector of the republic, in quantitative terms, the share of agricultural enterprises with state ownership is 0.4 %, and private enterprises account for 99.6 %. At the same time, the vast majority of private farms carry out the laborious process manually. Due to the fact that in recent years the requirements for the quality of milk have become stricter, processing enterprises accept milk obtained only by machine. Accordingly, the number of farms decreased, milk yields decreased. It is possible to increase milk yield by organizing summer farms on decentralized agricultural land. To create such farms, it is necessary to introduce the technology of anaerobic digestion of cow manure in bioenergy plants with the conversion of the resulting biogas into electrical energy. There are various technologies in this direction. The use of psychrophilic accumulative technology is justified for use in a decentralized area. It works steadily at ambient temperatures from 5 °C and above, has a low-volume methane tank up to one cubic meter, which makes it affordable to purchase and easy to maintain and operate. At the same time, the conducted biogas accumulates in a gas tank-compressor and is converted into electrical energy through a generator.

Keywords: manure, anaerobic process, biogas technologies, accumulative process, cogeneration, psychrophilic regime, summer farms, electric energy

For citation: Druz'yanova V. P., Savvateeva I. A., Gorokhov K. K., Bondarenko A. M. Psihrofil'naya nakopitel'naya biogazovaya tekhnologiya – osnova dlya proizvodstva elektricheskoy energii na zhivotnovodcheskih fermah [Psychrophilic storage biogas technology – the basis for the production of electrical energy on livestock farms]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. – *Far Eastern Agrarian Herald*, 2022; 1 (61): 111–118. (in Russ.). doi: 10.24412/1999-6837-2022-1-111-118.

Введение. Животноводческая отрасль в Якутии почти на 90 % представлена частными хозяйствами в форме крестьянских (фермерских) хозяйств, в которых процесс доения коров механизирован лишь на 30 %, а остальные работы производятся вручную.

Самой острой является проблема утилизации производимого животными навоза. Весьма малая часть навоза используется в качестве органического удобрения. Подавляющая масса просто стаскивается на близлежащие открытые местности без какого-либо обеззараживания и переработки. Вместе с тем, при отсутствии переработки, удобрительные качества

навоза утрачиваются, и он превращается в весьма опасный источник загрязнения окружающей среды [2, 3, 5, 6, 7, 10]. Загрязняются земли, открытые водоёмы, сохраняются и распространяются семена сорных растений, кучи навоза превращаются в ареал обитания мелких грызунов и других вредителей.

Следовательно, необходимо отказаться от практики вывоза неподготовленного навоза, получаемого в стойловый период, принять меры по его переработке и хранению с целью получения качественного органического удобрения и альтернативного топлива в виде биогаза и пиролизного газа.

Существуют различные методы и способы переработки бесподстилочного навоза животных для получения органических удобрений [1, 2, 10, 11, 12]. Но ни один из них не находит широкого и эффективного применения в Якутии по причине жёстких природно-климатических условий и низкого технического уровня сельскохозяйственного производства.

При утилизации бесподстилочного навоза нами предлагается использовать параллельно две технологии: биогазовую и пиролизную, осуществляемые в специальных биоэнергетических установках.

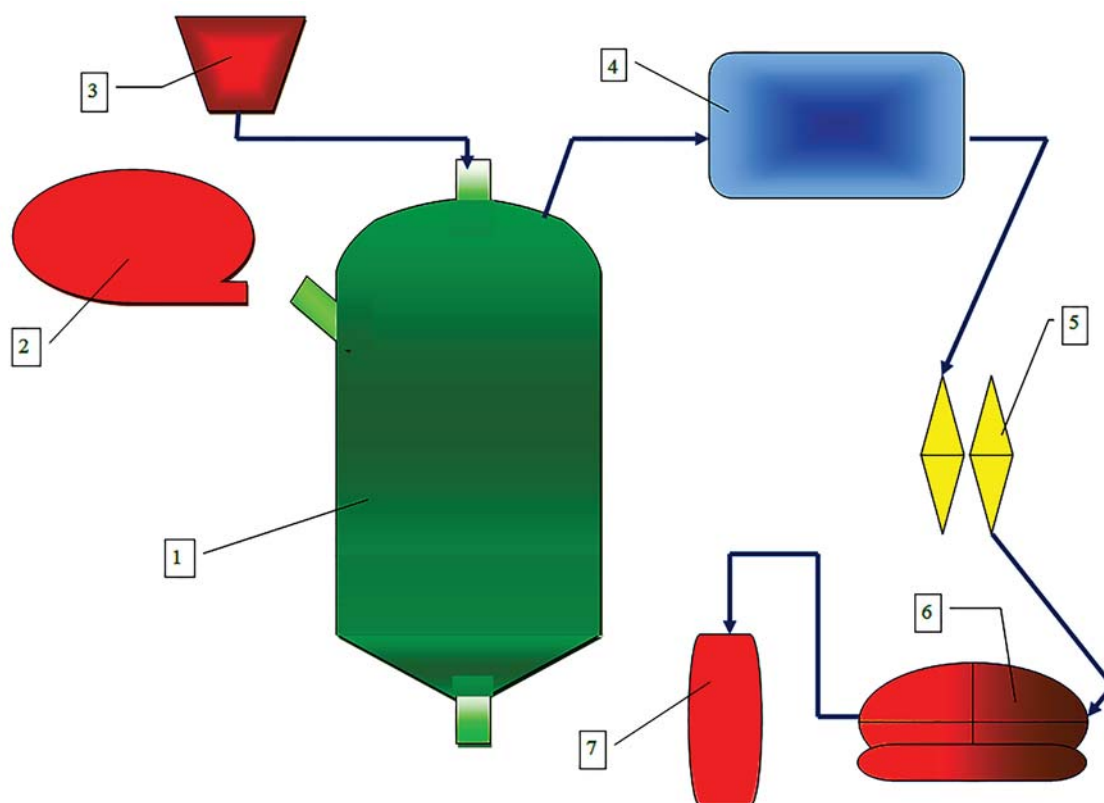
В Америке, Европе, Китае и Индии давно используют альтернативную энергетику, в том числе преобразовывают биогаз в электрическую энергию (процесс когенерации). Биогаз очищается от воды, других вредных составляющих, сжимается, пропускается через генератор, и на выходе получается электрическая энергия.

Известно, что в психрофильном режиме работы биоэнергетической уста-

новки получается наиболее качественный биогаз, в котором количество метана составляет от 80 % и выше. Ввиду сложных климатических условий и существующих форм ведения производства, в аграрном секторе Якутии для производства биогаза подходит накопительная психрофильная анаэробная технология, разработанная якутскими учёными.

Предлагаемая методика. В условиях региона наиболее подходит накопительная психрофильная анаэробная технология (НПАТ) [8]. Мы предлагаем её использование как основу когенерационной технологии, позволяющей фермерам создать автономное, энергосберегающее и независимое от сетевых электрических линий производство.

Отличие такой технологии от существующих заключается в том, что процесс анаэробного сбраживания жидкого (свежего) навоза протекает при температуре воздуха животноводческих помещений, которая варьирует от 5 до 18 °С (рис. 1).



1 – реактор; 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 накопительной психрофильной анаэробной технологии

Накопительность технологии заключается в том, что метаногенные бактерии, продуцирующие биогаз, за всё время работы биоэнергетической установки не вымываются из реактора, а изо дня в день увеличивают свою концентрацию, размножаясь в геометрической прогрессии. С истечением определённого периода колония метаногенных бактерий устаревает, что отслеживается уменьшением производимого ими горючего биогаза. Тогда переработанный субстрат (эффлюент) выгружается из реактора биоэнергетической установки, загружается свежая масса навоза и снова запускается процесс.

Эффективность такой технологии обоснована и доказана якутскими учёными, которые отмечают, что максимальный рабочий объём реактора биоэнергетической установки должен составлять один кубический метр. Увеличение рабочего объёма усложняет технологию, так как возникает необходимость наличия автоматической мешалки, электронной системы контроля и наблюдения над течением процесса и т. д. [8, 9].

Результаты и обсуждение. Рассчитан годовой экономический эффект от внедрения технологии преобразования биогаза в электрическую энергию при психрофильном режиме работы биоэнергетической установки на примере сельскохозяйственных организаций Таттинского района Республики Саха (Якутия) по формуле (1):

$$\mathcal{E}_{\text{гэ}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{гэ}}$ – годовой экономический эффект, тыс. руб;

\mathcal{E}_1 – годовой энергетический эффект, тыс. руб;

\mathcal{E}_2 – экономический эффект от повышения удоев молока, тыс. руб.

Годовой энергетический эффект от применения биогаза определяется по формуле (2) [4]:

$$\mathcal{E}_1 = V_6 \cdot \delta_{\text{экв}} \cdot \mathcal{C}_3 \quad (2)$$

где V_6 – общий выход биогаза, м³ в сезон;

$\delta_{\text{экв}}$ – коэффициент перевода биогаза в электроэнергию;

\mathcal{C}_3 – тариф за один киловатт·ч электроэнергии, руб.

При использовании формулы (2) коэффициент перевода биогаза в электроэнергию принят в размере 0,48. Тариф за один киловатт·ч электроэнергии составляет 4,55 рублей.

Экономический эффект от повышения удоев молока от внедрения автономной когенерационной линии находится по формуле (3):

$$\mathcal{E}_2 = M - (K_T + C_3) \quad (3)$$

где M – доход от повышения удоев на летних фермах, тыс. руб;

K_T – капитальные вложения для внедрения технологии когенерации биогаза в электрическую энергию, в результате переработки навоза крупного рогатого скота, тыс. руб;

C_3 – эксплуатационные затраты, тыс. руб.

Годовой экономический эффект от внедрения технологии преобразования биогаза в электрическую энергию в психрофильном режиме работы биоэнергетической установки составит:

1. По СХПК «Чычымах»:

а) годовой энергетический эффект составил 16,2 тыс. рублей;

б) экономический эффект от повышения удоев молока равен 3 644,6 тыс. рублей;

г) годовой (суммарный) экономический эффект достигнет 3 660,8 тыс. рублей.

2. По СХПК «Хочо»:

а) годовой энергетический эффект составил 20,9 тыс. рублей;

б) экономический эффект от повышения удоев молока равен 1 412,6 тыс. рублей;

г) годовой (суммарный) экономический эффект достигнет 1 433,5 тыс. рублей.

3. По ООО «Кэскил»:

а) годовой энергетический эффект составил 27,3 тыс. рублей;

б) экономический эффект от повышения удоев молока равен 3 392,6 тыс. рублей;

г) годовой (суммарный) экономический эффект достигнет 3 420,0 тыс. рублей.

Годовая экономия вычисляется по формуле (4):

$$\Gamma_{\text{ЭК}} = \Delta_{\text{ГЭ}} - C_{\text{Э}} \quad (4)$$

Для расчёта срока окупаемости используется формула (5):

$$C_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{Г}}}{\Gamma_{\text{ЭК}}} \quad (5)$$

Применяя формулы (4, 5), получили показатели экономической эффективности от внедрения технологии преобразования биогаза в электрическую энергию в психрофильном режиме работы биоэнергетической установки:

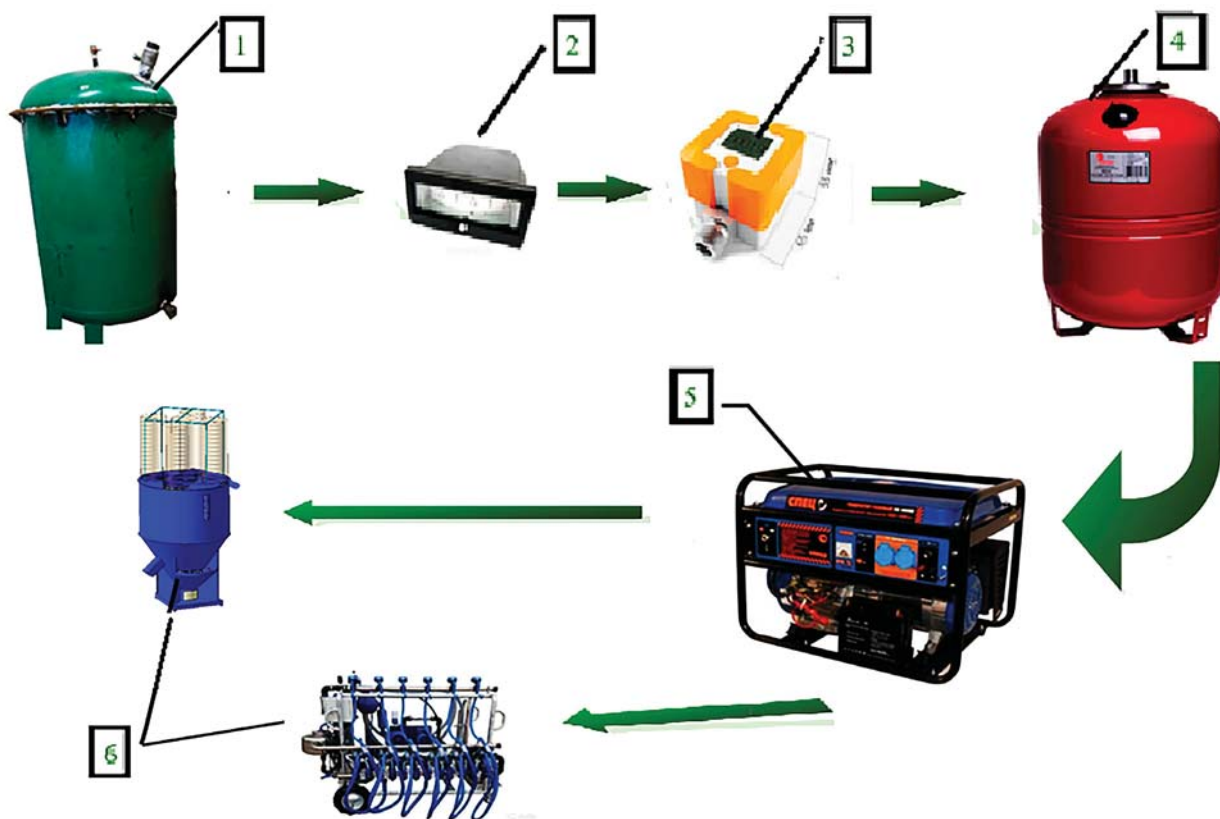
1. По СХПК «Чычымах» годовая экономия составит 3 608,4 тыс. рублей, срок окупаемости – 0,113 года.

2. По СХПК «Хочо» годовая экономия составит 1 381,1 тыс. рублей, срок окупаемости – 0,295 года.

3. По ООО «Кэскил» годовая экономия составит 3 367,6 тыс. рублей, срок окупаемости – 0,121 года.

Как видно, окупаемость от внедрения предлагаемой технологии когенерации биогаза весьма быстрая. В расчётах не учтено применение образуемой генератором тепловой энергии, что является вопросом дальнейших исследований.

Таким образом, для механизации процессов доения и подготовки кормов к вскармливанию предлагается внедрить в летние фермы когенерационную технологию, включающую следующий перечень оборудования (рис. 2):



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 2 – Когенерационная биогазовая линия

- 1) два метантенка объёмами по одному кубическому метру;
- 2) два газгольдер-компрессора объёмами 50 литров;
- 3) газовый генератор SG-6500E.

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

Список источников

1. Алёшкин В. Р., Рощин П. М. Механизация животноводства. М. : Колос, 1993. 319 с.
2. Бесподстилочный навоз и его использование для удобрения / Г. Кориат, М. Бельке, П. Ведекинд [и др.]. М. : Колос, 1978. 271 с.
3. Варламов Т. П. Механизация удаления и использования навоза. М. : Колос, 1969. 199 с.
4. Гераскин Н. Н. Планировка и застройка фермерских усадеб. М. : Колос, 2000. 160 с.
5. Горбунов А. В. Центровывоз животноводческой продукции в агропромышленном комплексе. М. : Агропромиздат, 1988. 110 с.
6. Докучаев Н. А., Стома Л. А., Гогин В. М. Удаление и использование навоза. М. : Россельхозиздат, 1976. 53 с.
7. Долгов В. С. Гигиена уборки и утилизации навоза. М. : Россельхозиздат, 1984. 175 с.
8. Друзьянова В. П. Ресурсосберегающая технология утилизации бесподстилочного навоза крупного рогатого скота в условиях Республики Саха (Якутия) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2004. 24 с.
9. Егорова Е. Н. Обоснование параметров метантенка малого объёма с перемешивающим устройством для условий Республика Саха (Якутия) : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Благовещенск, 2017. 20 с.
10. Животноводческие комплексы и охрана окружающей среды / Ю. И. Ворошилов, С. Д. Дурдыбаев, Л. Н. Ербанова [и др.]. М. : Агропромиздат, 1991. 107 с.
11. Ковалёв Н. Г., Глазков И. К. Проектирование систем утилизации навоза на комплексах. М. : Агропромиздат, 1989. 160 с.
12. Мельников С. В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов. Л. : Агропромиздат, 1985. 640 с.
13. О состоянии агропромышленного комплекса Республики Саха (Якутия) за 1990–1999 гг. Статистический сборник. Якутск : Госкомстат Республики Саха (Якутия), 2000. 105 с.
14. Савватеева И. А. Технология производства электроэнергии из биогаза, получаемого от навоза крупного рогатого скота // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. № 2 (58). С. 144–151 с.
15. Сельское хозяйство Республики Саха (Якутия). Статистический справочник. Якутск : Госкомстат Республики Саха (Якутия), 2000. 27 с.

References

1. Aleshkin V. R., Roshchin P. M. *Mekhanizatsiya zhivotnovodstva [Animal husbandry mechanization]*, Moskva, Kolos, 1993, 319 p. (in Russ.).
2. Koriat G., Boelke M., Vedekind P. [et al.]. *Bespodstilochnyi navoz i ego ispol'zovanie dlya udobreniya [Less-litter manure and its use for fertilization]*, Moskva, Kolos, 1978, 271 p. (in Russ.).
3. Varlamov T. P. *Mekhanizatsiya udaleniya i ispol'zovaniya navoza [Mechanization of utilizing and using of manure]*, Moskva, Kolos, 1969, 199 p. (in Russ.).

4. Geraskin N. N. *Planirovka i zastroika fermerskikh usadeb [Planning and development of farmsteads]*, Moskva, Kolos, 2000, 160 p. (in Russ.).
5. Gorbunov A. V. *Tsentrovyvoz zhiivotnovodcheskoi produktsii v agropromyshlennom komplekse [Center export of livestock products in the agro-industrial complex]*, Moskva, Agropromizdat, 1988, 110 p. (in Russ.).
6. Dokuchaev N. A., Stoma L. A., Gogin V. M. *Udalenie i ispol'zovanie navoza [Manure removal and use]*, Moskva, Rossel'khozizdat, 1976, 53 p. (in Russ.).
7. Dolgov V. S. *Gigiena uborki i utilizatsii navoza [Hygiene of cleaning and disposal of manure]*, Moskva, Rossel'khozizdat, 1984, 175 p. (in Russ.).
8. Druz'yanova V. P. Resursosberegayushchaya tekhnologiya utilizatsii bespodstilochnogo navoza krupnogo rogatogo skota v usloviyakh Respubliki Sakha (Yakutiya) [Resource-saving technology for processing litter-less cattle manure in the conditions of Sakha Republic (Yakutia)]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Ulan-Ude, 2004, 24 p. (in Russ.).
9. Egorova E. N. Obosnovanie parametrov metantenka malogo ob'ema s peremeshivayushchim ustroystvom dlya uslovii Respublika Sakha (Yakutiya) [Substantiation of the parameters of a small-volume digester with a stirrer for the conditions of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Blagoveshchensk, 2017, 20 p. (in Russ.).
10. Voroshilov Yu. I., Durdybaev S. D., Erbanova L. N. [et al.]. *Zhiivotnovodcheskie komplekсы i okhrana okruzhayushchei sredy [Animal husbandry complexes and environmental protection]*, Moskva, Agropromizdat, 1991, 107 p. (in Russ.).
11. Kovalev N. G., Glazkov I. K. *Proektirovanie sistem utilizatsii navoza na kompleksakh [Design of manure disposal systems at complexes]*, Moskva, Agropromizdat, 1989, 160 p. (in Russ.).
12. Mel'nikov S. V. *Tekhnologicheskoe oborudovanie zhiivotnovodcheskikh ferm i kompleksov [Technological equipment for livestock farms and complexes]*, Leningrad, Agropromizdat, 1985, 640 p. (in Russ.).
13. O sostoyanii agropromyshlennogo kompleksa Respubliki Sakha (Yakutiya) za 1990–1999 gg. *Statisticheskii sbornik [On the state of the agro-industrial complex of the Republic of Sakha (Yakutia) for 1990–1999. Statistical compendium]*, Yakutsk, Goskomstat Respubliki Sakha (Yakutiya), 2000, 105 p. (in Russ.).
14. Savvateeva I. A. Tekhnologiya proizvodstva elektroenergii iz biogaza, poluchaemogo ot navoza krupnogo rogatogo skota [Technology of electricity production from biogas obtained from cattle manure]. *Dal'nevostochnyi agrarnyi vestnik. – Far Eastern Agrarian Herald*, 2021; 2 (58): 144–151 (in Russ.).
15. *Sel'skoe khozyaistvo Respubliki Sakha (Yakutiya). Statisticheskij spravochnik [Agriculture of the Republic of Sakha (Yakutia). Reference Book]*, Yakutsk, Goskomstat Respubliki Sakha (Yakutiya), 2000, 27 p. (in Russ.).

© Друзьянова В. П., Савватеева И. А., Горохов К. К., Бондаренко А. М., 2022

Статья поступила в редакцию 17.12.2021; одобрена после рецензирования 17.01.2022; принята к публикации 02.03.2022.

The article was submitted 17.12.2021; approved after reviewing 17.01.2022; accepted for publication 02.03.2022.

Информация об авторах

Друзьянова Варвара Петровна, доктор технических наук, профессор, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, Октёмский филиал Арктического государственного агротехнологического университета, druzvar@mail.ru;

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

Горохов Константин Константинович, аспирант, Арктический государственный агротехнологический университет, alaas_gorokhov@mail.ru;

Бондаренко Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета, bondanmih@rambler.ru

Information about authors

Varvara P. Druz'yanova, Doctor of Technical Sciences, Professor, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Arctic State Agrotechnological University – Oktemsky Branch, druzvar@mail.ru;

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

Konstantin K. Gorokhov, Postgraduate Student, Arctic State Agrotechnological University, alaas_gorokhov@mail.ru;

Anatoly M. Bondarenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Don State Agricultural University – Azov Black Sea Engineering Institute, bondanmih@rambler.ru