

УДК 519.87:620.95+631.862

DOI: 10.24412/1999-6837-2021-4-182-190

Математическая зависимость процесса когенерации биогаза в электрическую энергию при психрофильном режиме

Ирина Аркадьевна Савватеева¹, Варвара Петровна Друзьянова²

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

²Октемский филиал Арктического государственного агротехнологического университета,
Республика Саха (Якутия), с. Октемцы, Россия

¹karinushka_nv25@mail.ru, ²druzvar@mai.ru

Аннотация. В Республике Саха (Якутия) по состоянию на 1 января 2021 г. находится 297 труднодоступных населённых пунктов с численностью населения 542,5 тыс. чел. Все необходимые элементы жизнеобеспечения доставляются лишь в холодные месяцы, когда открывается зимняя дорога. Но даже в этот сезон транспортировка осуществляется в недостаточном объёме, особенно следует отметить недостаток моторного топлива. Частично эту проблему можно решить, внедрив биогазовую технологию. Производство и использование биогаза может стать существенным вкладом в дело повсеместной организации мелких летних ферм. Оно позволит увеличить объёмы удоев молока, а также даст возможность создать новые рабочие места в сельской местности (логистика, инженерные услуги, строительство зданий и сооружений). Проведённые теоретические исследования позволили наметить пути решения изложенной отраслевой задачи путем разработки новых технологических решений, позволяющих освоить децентрализованные угодья. Существующие в данное время зарубежные и российские биогазовые технологии исключают возможность их применения в природно-климатических условиях ведения производства в аграрном секторе Якутии, так как они рассчитаны для крупных животноводческих хозяйств, имеют значительную цену и работают в мезофильном режиме, то есть требуют подключения к центральной электрической сети. Главным критерием использования биогаза как топлива является возможность создания энергонезависимого автономного производства. Биогаз используют как альтернативное топливо в системах отопления помещений, как моторное топливо в двигателях внутреннего сгорания. Его преобразуют в электроэнергию и применяют в приготовлении пищи. Якутскими учеными, ввиду холодного климата региона, исследован и апробирован анаэробный процесс в психрофильном режиме работы установок. При этом впервые разработаны динамическая и математическая модели анаэробного процесса при психрофильном режиме работы биогазовых установок.

Ключевые слова: анаэробный процесс, биогазовые технологии, биогаз, когенерация, психрофильный режим, летние фермы, автономное электричество, независимое автономное производство, биоэнергетические установки

Для цитирования: Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Математическая зависимость процесса когенерации биогаза в электрическую энергию при психрофильном режиме // Дальневосточный аграрный вестник. 2021. Вып. 4 (60). С. 182–190. doi: 10.24412/1999-6837-2021-4-182-190.

Mathematical dependence of cogeneration process of biogas into electrical energy in psychrophilic regime

Irina A. Savvateeva¹, Varvara P. Druzianova²

^{1,2}North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov,
Sakha Republic (Yakutia), Yakutsk, Russia

²Oktemsky Branch of the Arctic State Agrotechnological University,
Sakha Republic (Yakutia), Oktemtsy, Russia

¹karinushka_nv25@mail.ru, ²druzvar@mai.ru

Abstract. In the Republic of Sakha (Yakutia), as of January 1, 2021, there are 297 hard-to-reach settlements with a population of 542.5 thousand people. All the necessary life support elements are delivered only in the cold months, when the winter road opens. But even in this season, transportation is carried out in insufficient volume, especially the lack of motor fuel should be noted. Part of this problem can be solved by introducing biogas technology. The production and use of biogas can become a significant contribution to the widespread organization of small summer farms. It will increase the volume of milk yields, as well as provide an opportunity to create new jobs in rural areas (logistics, engineering services, construction of buildings and structures). The theoretical studies carried out made it possible to outline ways to solve the stated industry problem by developing new technological solutions that allow the development of decentralized lands. The currently existing foreign and Russian biogas technologies exclude the possibility of their application in the natural and climatic conditions of production in the agricultural sector of Yakutia, since they are designed for large livestock farms, have a significant price and operate in mesophilic mode, that is, they require connection to the central electric grid. The main criterion for using biogas as a fuel is the possibility of creating a non-volatile autonomous production. Biogas is used as an alternative fuel in indoor heating systems, as motor fuel in internal combustion engines. It is converted into electricity and used in cooking. Yakut scientists, due to the cold climate of the region, investigated and tested the anaerobic process in the psychrophilic mode of the installations. At the same time, dynamic and mathematical models of the anaerobic process in the psychrophilic mode of operation of biogas plants were developed for the first time.

Keywords: anaerobic process, biogas technologies, biogas, cogeneration, psychrophilic regime, summer farms, autonomous electricity, independent autonomous production, bioenergy installations

For citation: Savvateeva I. A., Druzianova V. P. Mathematical dependence of cogeneration process of biogas into electrical energy into a psychrophilic regime. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik = Far Eastern Agrarian Herald*. 2021; 4 (60): 182–190. (In Russ.). doi: 10.24412/1999-6837-2021-4-182-190.

Введение. Исследованием биогазовой технологии занимались зарубежные и российские учёные. Однако существующие на сегодняшний день теоретические (математические) описания анаэробного сбраживания и процесса преобразования биогаза в топливо или электрическую энергию даны при функционировании мезофильного режима. В данной работе предложено внедрение и использование психрофильной биогазовой установки, когда энергогенерирующая линия сооружается и запускается в работу в тёплое время года на улице и без дополнительных нагревательных элементов.

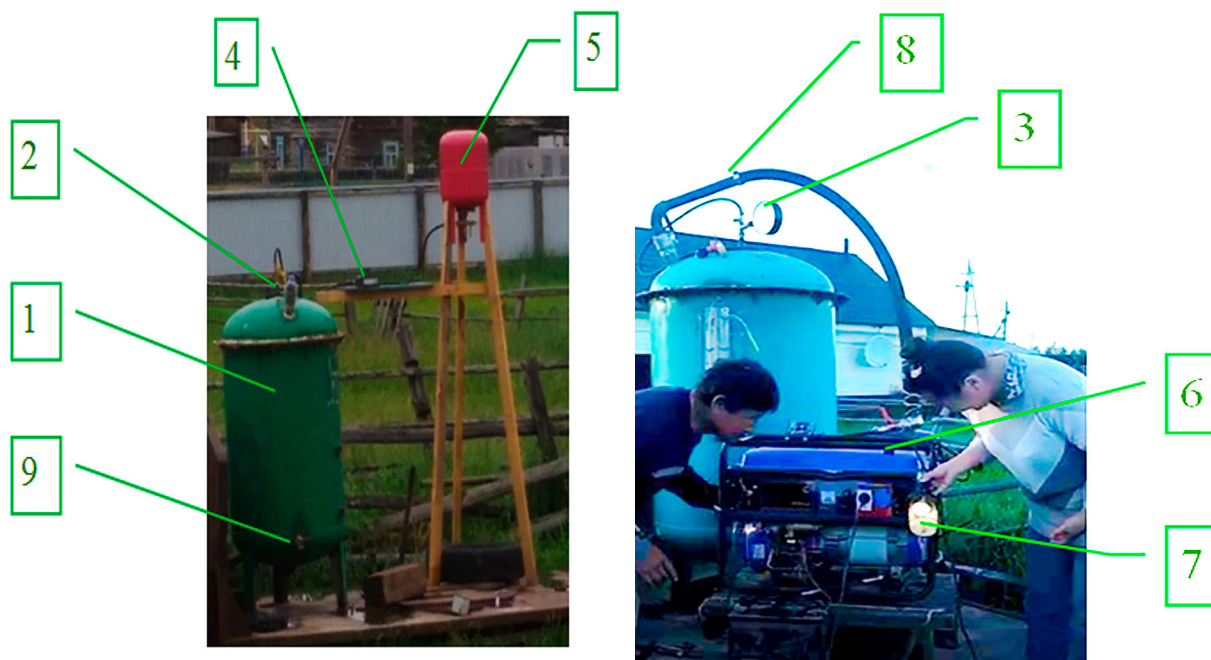
Целью представленного исследования является процесс математического описания преобразования биогаза в электрическую энергию в психрофильном режиме работы накопительной биоэнергетической установки.

Существующие математические модели основываются на экспериментах, выполненных в условиях мезофильно-

го режима, когда биогазовая технология имеет дополнительные источники энергии для поддержания высокой температуры сбраживания, составляющей от 32 до 35 °С. Следовательно, имеющиеся в данное время математические зависимости не подходят для описания анаэробного процесса в психрофильном режиме, который осуществляется при температуре окружающей среды в диапазоне от 5 до 20 °С.

В данной работе математически описывается автономная когенерационная технология, которая продуцирует биогаз в психрофильной установке без дополнительных источников подогрева извне. Это важно, поскольку предлагаемая и разработанная нами технология будет работать в летних фермах, организуемых на территории удаленных и заброшенных угодий Якутии.

Методика исследований. Пилотная энергогенерирующая биогазовая психрофильная линия была сооружена и апробирована в крестьянском хозяйстве (с. Тым-



1 – метантенк объёмом один кубометр; 2 – патрубок для загрузки; 3 – датчик давления; 4 – счетчик газа; 5 – газгольдер-компрессор; 6 – газовый генератор марки «СПЕЦ» модель SG-6500E; 7 – электрическая лампа мощностью 40 Ватт; 8 – газовые трубы; 9 – разгрузочный патрубок

Рисунок 1 – Общий вид пилотной линии по когенерации биогаза в электрическую энергию

пы Вилюйского района Республики Саха (Якутия) (рис. 1).

На первом этапе исследований были уточнены значения управляющих факторов, обеспечивающих оптимальный режим работы линии. В результате выявлены основные факторы, воздействующие на эффективный процесс преобразования биогаза в электроэнергию с первого метантенка в сутки:

- 1) оптимальная температура окружающего воздуха ($T_{окр}$) от 13 до 27 °С;
- 2) давление в компрессоре-газгольдере от 3 до 4 кПа;
- 3) объём производимого биогаза (V_B) от 0,4 до 2,6 м³;
- 4) диаметр жиклера при входе в генератор, равный 40 мм.

При данных факторах параметр процесса (количество производимой электроэнергии), будет находиться в пределах от 0,2 до 2,4 кВт/сут.

На основе динамической модели была получена математическая модель анаэробного сбраживания в виде (1) [24]:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= (\mu - \tilde{\mu})T, \\ \frac{dS}{d\tau} &= \tau j_s T - V - \bar{V}, \\ \frac{dP}{d\tau} &= \tau j_p T - M + \bar{M} \end{aligned} \quad (1)$$

где T , S , P – соответственно концентрации сбраживаемого навоза, субстрата и продукта метаболизма, кг/т;

τ – продолжительность анаэробного сбраживания;

μ , $\tilde{\mu}$ – соответственно удельные скорости роста и метаболизма биомассы сбраживаемого субстрата, сут.⁻¹;

j_s и j_p – соответственно удельные скорости разложения субстрата и образования продукта метаболизма, сут.⁻¹;

V и вектор V – соответственно скорости разложения субстрата и образования продукта метаболизма, кг/т·сут.;

M и вектор M – соответственно скорости массообмена субстрата и продуктов метаболизма при переходе из одной фазы в другую, кг/т·сут.

Ввиду того, что технология запускается и функционирует в летнее время, когда наружная температура положительная, для устойчивой работы биоэнергетической установки требуется только постоян-

ство температурного режима. В целях интенсификации процесса в психрофильном режиме при запуске биоэнергетических установок используется закваска, обсеменённая рабочими мезофильными метаногенными микроорганизмами и адаптированными к психрофильным условиям [24].

Большой вклад в исследования по работе автономных биоэнергетических установок внесли Орозмамат Мамасалиевич Осмонов и Андрей Александрович Ковалёв.

О. М. Осмоновым сформулирована следующая математическая зависимость (2) [17]:

$$W = \sum P_{н(i)} \cdot t_{р(i)} \quad (2)$$

где W – потребность в энергии, Вт·ч;

$P_{н(i)}$ – мощность устройства-потребителя электроэнергии, Вт;

$t_{р(i)}$ – время работы устройства, час.

Однако, в своих экспериментах автор использовал дополнительные источники тепла в виде солнечных модулей. Соответственно, применение мезофильного режима работы исключается в условиях фермерских хозяйств Якутии ввиду дороговизны установок таких модулей. Испытания разработанной технологии проводились с дозой загрузки 4,5 % объёма метантенка. Объём полезного продукта составил 1,26 м³ в сутки. Также были получены 110 кг в сутки обеззараженных органических удобрений.

А. А. Ковалёв разработал модернизированную схему биоэнергетической установки [14]. Испытания проводились на органическом сырье фермы крупного рогатого скота в 400 голов. За счёт использованию усовершенствованной системы теплоснабжения были достигнуты следующие результаты по количеству электрической энергии: 1237,478 кВт·ч в сутки и 374,8 кВт·ч в сутки. При этом максимальное количество производимой тепловой энергии составило 0,336 кВт·ч в сутки, количество рекуперированной теплоты – 0,448 кВт·ч в сутки, скорость нагрева достигала 0,46 °C в минуту.

В результате испытаний А. А. Ковалёвым сформирована энергонезависимая технология по переработке бесподстилочного навоза крупного рогатого скота с модернизированной схемой теплоснабжения

биогазовой установки. Следует отметить, что технология Ковалёва также работает в мезофильном режиме, который весьма требователен к изменениям рабочей температуры сбраживания. При процессе ферментации допустимые изменения температуры в мезофильном режиме должны находиться в пределах плюс (минус) одного градуса Цельсия в час [18].

Ковалёвым предложена следующая математическая зависимость (3):

$$Q_p = \left(\frac{C_H \cdot \rho_H \cdot V_H \cdot (T_H - T_{Oxmin}) \cdot 10^{-3}}{24 \cdot 3600} \right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \right) n \quad (3)$$

где Q_p – количество теплоты, кВт·ч;

C_H^p – теплоёмкость субстрата, кДж на кг·°C;

ρ_H – плотность субстрата, кг/м³;

V_H – доза загрузки, м³/сут.;

T_H – температура сбраживания, °C;

T_{Oxmin} – температура эфлюента в резервуаре, необходимая для прекращения остаточного газовыделения, °C;

ε – коэффициент теплопередачи;

n – время работы в сутки, час.

Результаты и обсуждение. Для математического описания процесса преобразования биогаза в электрическую энергию в психрофильном режиме исходили из известной формулы для определения количества потребляемой энергии (7):

$$W_{эл.эн.} = \frac{Q_б}{t} \quad (4)$$

где $W_{эл.эн.}$ – количество потребляемой энергии, кВт;

$Q_б$ – теплотворная способность биогаза, кДж;

t – время работы, с.

Исходя из соотношения, что один киловатт равен одному килоджоулю в секунду, необходимо определить теплотворную способность биогаза.

В своей работе В. П. Друзыянова разработала зависимость, описывающую теплотворную способность биогаза, в следующем виде (5) [11]:

$$Q_б = V_б \cdot c_б \cdot (T_{сбр} - T_{окр}) \quad (5)$$

где V_6 – объём биогаза, м³;
 c_6 – удельная теплоёмкость биогаза, кДж/К·м³;
 $T_{сбр}$ – температура сбраживания, К;
 $T_{окр}$ – температура окружающей среды, К.

Данная зависимость разработана и подходит для установок в мезофильном режиме работы [11].

В случае психрофильного режима выход биогаза происходит без дополнительного нагрева, поэтому будем исходить из формулы количества теплоты Q , выделяющегося при сгорании топлива (6):

$$Q = \lambda \cdot m \quad (6)$$

где λ – теплота сгорания вещества, кДж/кг;
 m – масса вещества, кг.

Так как топливо является биогазом, массу преобразовываем по формуле (7):

$$m = \rho \cdot V \quad (7)$$

где ρ – плотность биогаза, кг/м³;
 V – объём биогаза, м³.

Объединяя формулы (4), (6) и (7) получим выражение (8):

$$W_{эл.эн.} = \frac{\lambda_6 \cdot \rho_6 \cdot V_6}{t} \quad (8)$$

где λ_6 – теплота сгорания одного кубометра биогаза, кДж/м³;
 ρ_6 – плотность биогаза, кг·м³;
 V_6 – объём биогаза, м³;
 t – время работы генератора, с.

Разработанная зависимость (8) позволяет рассчитать ожидаемое количество электроэнергии, которую можно производить из биогаза, сжигая его в газовых генераторах.

При окончательном планировании ожидаемого количества энергии нужно учесть, что 20 % энергии теряется на коэффициент полезного действия генератора.

Ввиду того, что размеры молекул биогаза больше молекул природного газа, необходимо подбирать диаметр жиклера, через который биогаз подается в камеру сгорания генератора. Это объясняется тем, что сера, входящая в состав биогаза, состоит из длинных линейных молекул, поэтому диаметр жиклера для природного газа не подходит. В отличие от биогаза основную часть природного газа составляет метан (СН₄), доля которого достигает от 70 до 98 % (молярная масса метана составляет 16,04 г/моль). В свою очередь, в состав биогаза входят метан (СН₄ с долей от 92 до 94 %), углекислый газ (СО₂, с долей 7 %). Биогаз также включает небольшие количества сероводорода (Н₂С с молярной массой 34,08 г/моль и долей 0,03 %), аммиака (NH₃ с молярной массой 17,03 г/моль и долей 0,01 %) и водорода (Н₂, с молярной массой 2,01 г/моль и долей 0,02 %).

Поскольку предлагаемая технология внедряется в летние фермы, то марку генератора следует выбирать под конкретное оборудование для механизации трудоёмких процессов. На данный момент для молочных ферм имеется основное требование обязательного применения доильных установок. Исходя из этого предложено использовать газовый генератор марки «СПЕЦ» (модель SG-6500E) [22, 24]. Данная модель вырабатывает пять киловатт мощности при уровне подачи топлива более 1,4 кубометра в час.

Таким образом, подставляя необходимые данные в формулу (8), можно определить требуемое количество потребляемой энергии для функционирования той или другой машины или оборудования при механизации процессов животноводства.

Список источников

1. Апробация новой биогазовой технологии: эксперименты и результаты / В. П. Друзьянова, С. А. Петрова, М. К. Охлопкова [и др.] // Журнал борьбы с промышленным загрязнением окружающей среды. 2017. № 1 (33). С. 1058–1066.
2. Баадер В., Доне Е., Бренндерфер М. Биогаз: Теория и практика. М. : Колос, 1982. 148 с.
3. Безруких П. П. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование. 2015. № 1 (29). С. 5–17.
4. Биогаз – высокорентабельное топливо для всех регионов России / Е. С. Панцхава, М. М. Шипилов, А. П. Пауков // Новости теплоснабжения. 2008. № 1. С. 20–23.
5. Биогаз на основе возобновляемого сырья – сравнительный анализ шестидесяти одной установки по производству биогаза в Германии // Специальное агентство возобновляемых ресурсов (FNR). URL: <https://mediathek.fnr.de/russische-kurzfassung-biogas-messprogramm-ii.html> (дата обращения 11.02.2014).
6. Веденев А. Г. Веденева Т. А. Биогазовые технологии в Кыргызской Республике. Бишкек : Полиграфическое оформление, 2006. 90 с.
7. Веденев А. Г., Веденева Т. А. Руководство по биогазовым технологиям. Бишкек : ДЭМИ, 2011. 84 с.
8. Государственное собрание (ИЛ ТУМЭН) Республики Саха (Якутия) : сайт. URL: <https://iltumen.ru> (дата обращения: 19.05.2021).
9. Гюнтер Л. И., Гольдфраб Л. Л. Метантенки. Москва : Стройиздат, 1991. 128 с.
10. Даянова Г. И., Егорова Г. И., Протопопова Л. Д. Анализ эффективности использования сельскохозяйственных угодий в Республике Саха (Якутия) // Сборник научных трудов Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства. 2016. № 9 (1). С. 509–512.
11. Друзьянова В. П. Энергосберегающая технология переработки навоза крупного рогатого скота : автореф. дис. ... докт. техн. наук. Улан-Удэ, 2015. 22 с.
12. 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.
13. 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.
14. Ковалев А. А. Повышение энергетической эффективности биогазовых установок : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 22 с.
15. Ковалев В. В., Унгурияну Д. В., Ковалёва О. В. Теоретические и практические аспекты совершенствования процессов биогазовой технологии // Проблемы региональной энергетики. 2012. № 1. С. 102–114.
16. Костромин Д. В. Анаэробная переработка органических отходов животноводства в биореакторе с барботажным перемешиванием : автореф. дис. канд. техн. наук. М., 2010. 17 с.
17. Осмонов О. М. Научно-технические основы создания автономных биоэнергетических установок для крестьянских (фермерских) хозяйств в горных районах Киргизии : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2012. 36 с.
18. Отчёт о реализации государственной программы Республики Саха (Якутия) «Развитие сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2020–2024 гг.» за 2020 г. // Министерство сельского хозяйства Республики Саха (Якутия). URL: <https://minsel.sakha.gov.ru/uploads/83/5dadf11279589b6f99471745d9ea6434ed0ae8f6.doc> (дата обращения: 08.06.2021).
19. Петров К. П. Аэродинамика тел простейших форм. М. : Физматлит, 1998. 428 с.

20. 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.
21. Ресурсосберегающая технология производства экологически чистых органических удобрений / В. П. Друзьянова, С. А. Петрова, М. К. Охлопкова [и др.] // Дуна. 2018. № 4 (93). С. 398–403.
22. Савватеева И. А., Друзьянова В. П. Когенерация биогаза в электрическую энергию для организации летних ферм в Якутии // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология : материалы II междунар. науч.-практ. конф. (Якутск, 16–17 апреля 2020 г.). Якутск : Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, 2020. С. 47–51.
23. Семенова О. П. Повышение экологической безопасности в сельскохозяйственном производстве путем применения фильтра очистки биогаза с природным цеолитом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Якутск, 2018. 24 с.
24. Электроэнергия из биогаза / И. А. Савватеева, И. Ю. Александров, В. П. Друзьянова [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 5 (187). С. 139–145.

References

1. V. P. Druzianova, S. A. Petrova, M. K. Okhlopkova, A. V. Spiridonova, A. M. Bondarenko. Aprobatsiia novoi biogazovoi tekhnologii: eksperimenty i rezul'taty [Approbation of new biogas technology: experiments and results]. *Zhurnal bor'by s promyshlennym zagriazneniem okruzhaiushchei sredy. – Journal of Combating Industrial Pollution of the Environment*, 2017; 1 (33): 1058–1066 (in Russ.).
2. Baader V., Done E., Brennderfer M. *Biogaz: Teoriia i praktika [Biogas: Theory and Practice]*, Moskva, Kolos, 1982, 148 p. (in Russ.).
3. Bezrukikh P. P. Effektivnost' vobnovliaemoi energetiki. Mify i fakty [Renewable energy efficiency. Myths and facts]. *Tekhnologii, sredstva mekhanizatsii i energeticheskoe oborudovanie. – Technologies, means of mechanization and power equipment*, 2015; № 1 (29): 5–17 (in Russ.).
4. Pantskhava E. S., Shipilov M. M., Paukov A. P., Kovalev N. D. Biogaz – vysokorentabel'noe toplivo dlia vseh regionov Rossii [Biogas is a highly profitable fuel for all regions of Russia]. *Novosti teplosnabzheniia. – Heat supply news*, 2008; 1: 20–23 (in Russ.).
5. Biogaz na osnove vobnovliaemogo syr'ia – Sravnitel'nyi analiz shestidesiati odnoi ustanovki po proizvodstvu biogaza v Germanii [Biogas based on renewable raw materials – Comparative analysis of sixty-one biogas plants in Germany]. *mediathek.fnr.de* Retrieved from URL: <https://mediathek.fnr.de/russische-kurzfassung-biogaz-messprogramm-ii.html> (Accessed 11 February 2014) (in Russ.).
6. Vedenev A. G., Vedeneva T. A. *Biogazovye tekhnologii v Kyrgyzskoi Respublike [Biogas technologies in the Kyrgyz Republic]*, Bishkek, Poligraficheskoe oformlenie, 2006, 90 p. (in Russ.).
7. Vedenev A. G., Vedeneva T. A. *Rukovodstvo po biogazovym tekhnologiam [Biogas Technology Guide]*, Bishkek, DEMI, 2011, 84 p. (in Russ.).
8. Gosudarstvennoe sobranie (IL TUMEN) Respubliki Saha (Yakutiya) [The State Assembly (IL TUMEN) of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *iltumen.ru* Retrieved from <https://iltumen.ru> (Accessed 19 May 2021) (in Russ.).
9. Giunter L. I., Goldfrab L. L. *Metantenki [Digesters]*, Moskva, Stroiizdat, 1991, 128 p. (in Russ.).
10. Daianova G. I. Analiz effektivnosti ispol'zovaniia zemel' sel'skokhoziaistvennogo naznacheniiia [Analysis of the efficiency of agricultural land use in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Sbornik nauchnykh trudov Vserossijskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ovcevodstva i kozovodstva. – Collection of scientific papers of the All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Breeding*, 2016; № 9 (1): 509–512 (in Russ.).

11. Druzianova V. P. Energoberegaiushchaia tekhnologiya pererabotki navoza krupnogo rogatogo skota [Energy-saving technology for processing cattle manure]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Ulan-Ude, 2015, 22 p. (in Russ.).
12. 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.).
13. Egorova E. N. Obosnovanie parametrov metantenkamalogo ob'ema speremeshivaiushchim ustroystvom dlia uslovii Respubliki Sakha (Iakutiia) [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*. Blagoveshchensk, 2017, 20 p. (in Russ.).
14. Kovalev A. A. Povysenie energeticheskoi effektivnosti biogazovykh ustanovok [Increasing of the energy efficiency of biogas plants]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moskva, 2014, 22 p. (in Russ.).
15. Kovalev V. V., Ungurianu D. V., Kovaleva O. V. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty sovershenstvovaniia protsessov biogazovoi tekhnologii [Theoretical and practical aspects of improving the processes of biogas technology]. *Problemy regional'noi energetiki. – Problems of regional energy*, 2012; 1: 102–114 (in Russ.).
16. Kostromin D. V. Anaerobnaia pererabotka organicheskikh otkhodov zhivotnovodstva v bioreaktore s barbotazhnym peremeshivaniem [Anaerobic processing of organic animal waste in a bioreactor with bubbling mixing]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moskva, 2010, 17 p. (in Russ.).
17. Osmonov O. M. Nauchno-tekhnicheskie osnovy sozdaniia avtonomnykh bioenergeticheskikh ustanovok dlia krest'ianskikh (fermerskikh) hoziaystv v gornyykh rayonakh Kirgizii [Scientific and technical foundations for the creation of autonomous bioenergy installations for peasant (farmer) households in the mountainous regions of Kyrgyzstan]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Moskva, 2012, 36 p. (in Russ.).
18. Otchet o realizatsii gosudarstvennoy programmy Respubliki Saha (Yakutiya) 'Razvitie sel'skogo hoziaystva i regulirovaniia rynkov sel'skokoziaystvennoy produktsii, syr'ia i prodovol'stviia na 2020–2024 gody' za 2020 g. [Report on the implementation of the state program of the Republic of Sakha (Yakutia) "Development of agriculture and regulation of markets for agricultural products, raw materials and production for 2020–2024" for 2020]. *minsel.sakha.gov.ru* Retrieved from <https://minsel.sakha.gov.ru/uploads/83/5dadf11279589b6f99471745d9ea6434ed0ae8f6.doc> (Accessed 8 June 2021) (in Russ.).
19. Petrov K. P. *Aerodinamika tel prosteishikh form [Aerodynamics of bodies of the simplest shapes]*, Moskva, Fizmatlit, 1998, 428 p. (in Russ.).
20. Petrov N. V. Obespechenie rabotosposobnosti benzinovykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia sel'skokhoziaistvennoi tekhniki pri perevode na biogaz korrektsionirovaniem regulirovochnykh parametrov dvigatel'ia [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-Ude, 2013, 20 p. (in Russ.).
21. Druzianova V. P., Petrova S. A., Okhlopko M. K., Sergeev Yu. O. Resursoberegaiushchaia tekhnologiya proizvodstva ekologicheskii chistykh organicheskikh udobrenii [Resource-saving technology for the production of environmentally friendly organic fertilizers]. *Dyna. – Dyna*, 2018; 4 (93): 398–403 (in Russ.).
22. Savvateeva I. A., Druz'ianova V. P. Kogeneratsiia biogaza v elektricheskuiu energiiu dlia organizatsii letnikh ferm v Iakutii [Cogeneration of biogas into electrical energy for the organization of summer farms in Yakutia]. Proceedings from Transport systems: safety, new technologies, ecology: *II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya (16–17 apreliia 2020 g.) – 2nd International Scientific and Practical Conference*. (PP. 139–145), Yakutsk, Severo-Vostochnyi federal'nyi institut imeni M. K. Ammosova, 2020 (in Russ.).

23. Semenova O. P. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti v sel'skokhoziaistvennom proizvodstve putem primeneniia fil'tra oчитki biogaza s prirodnyim tseolitom [Improvement of environmental safety in agricultural production by using a biogas filter with natural zeolite]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Yakutsk, 2018, 24 p. (in Russ.).

24. Savvateeva I. A., Aleksandrov I. Yu., Druz'ianova V. P., Kokieva G. E. Elektroenergiia iz biogaza [Electricity from biogas]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. – *Bulletin of the Altai State Agrarian University*, 2020; 5 (187): 139–145 (in Russ.).

© Савватеева И. А., Друзьянова В. П., 2021

Статья поступила в редакцию 09.10.2021; одобрена после рецензирования 20.11.2021; принята к публикации 09.12.2021.

The article was submitted 09.10.2021; approved after reviewing 20.11.2021; accepted for publication 09.12.2021.

Информация об авторах

Савватеева Ирина Аркадьевна, старший преподаватель кафедры эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, karinushka_nv25@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

Information about authors

Irina A. Savvateeva, Senior Lecturer of the Department of Operation of Road Transport and Car Service, North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, karinushka_nv25@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