Гладышева Ирина Владимировна – кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет им Г.Р. Державина», Россия, г. Тамбов, e-mail: gladysheva_irina78@mail.ru.

Вервекина Наталья Владимировна – кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет им Г.Р. Державина», Россия, г. Тамбов, e-mail: vervekinanv@mail.ru.

Нагорнов Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Ликсутина Анна Павловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», Россия, г. Тамбов, e-mail: liksutina68@gmail.com.

Романцова Анастасия Анатольевна – преподаватель Муниципального автономного общеобразовательного учреждения «Средняя общеобразовательная школа № 33», Россия, г. Тамбов, e-mail: romantsova.aa@yandex.ru.

Author credentials

Affiliations

Romantsova Svetlana – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Gladysheva Irina – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: gladysheva_irina78@mail.ru.

Vervekina Natalia – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R. Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: vervekinanv@mail.ru.

Nagornov Stanislav – Full Doctor of Technical sciences, Professor, Chief Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: snagornov@yandex.ru.

Lixutina Anna – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture”, Russia, Tambov, e-mail: liksutina68@gmail.com.

Romantsova Anastasia – Teacher of Municipal Autonomous Educational Institution “Middle School of General Education № 33”, Russia, Tambov, e-mail: romantsova.aa@yandex.ru.

Поступила в редакцию (Received): 28.08.2020 Принята к публикации (Accepted): 02.10.2020

УДК 662.76, 620.97

DOI: 10.35887/2305-2538-2020-5-111-118

СПОСОБ СИНТЕЗА БИОГАЗА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В КАЧЕСТВЕ ГАЗОМОТОРНОГО ТОПЛИВА

^{1,2}Романцова Светлана Валерьевна

³Якунина Ирина Владимировна

³Галкин Павел Александрович

³Милосердов Алексей Михайлович

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт

использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

²ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина»

³ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Реферат. Предлагается способ получения метана, как компонента газомоторного топлива, при утилизации промышленных и бытовых отходов с использованием метода анаэробного сбраживания. Представлены результаты эксперимента по получению биогаза из осадка, отобранного с иловой площадки очистных сооружений г. Тамбова. Определены различные характеристики этого вида отходов, включая содержание катионов металлов, нефтепродуктов, канцерогенных полициклических ароматических углеводородов, радионуклидов и патогенных микроорганизмов. Определён класс опасности отходов. Показано, что содержание опасных компонентов в изучаемом осадке сточных вод ниже требований ГОСТ. Определен состав и объем выделяющегося биогаза. Основным его компонентом является метан, в качестве побочных компонентов присутствуют кислород (около 20 %) и углекислый газ (от 0,2 до 9,7 %). Содержание сероводорода, аммиака и оксида углерода (II) менее 1 %. Установлено, что пик объемного выхода метана наступает на 9-11 сутки в зависимости от соотношения осадка и ила. Максимальный объем биогаза был получен в том случае, когда для сбраживания смешивали в соотношении 1:1 избыточный активный ил и осадок бытовых сточных вод. Утилизация осадка бытовых сточных вод и активного ила позволит освободить большие земельные участки, на которых в настоящий момент находятся илосборники и иловые карты. Эти земли могут вернуться в сельскохозяйственный оборот.

Ключевые слова: газомоторное топливо, биогаз, осадок сточных вод, избыточный активный ил, анаэробное сбраживание.

METHOD FOR SYNTHESIS OF BIOGAS, USED AS GAS ENGINE FUEL

^{1,2}Romantsova Svetlana

³Yakunina Irina

³Galkin Pavel

³Miloserdov Alexey

¹FSBSI "All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture"

²FSBEI HE "Tambov State University named after G.R. Derzhavin"

FSBEI HE "Tambov State Technical University"

Abstract. A method for producing methane, as a component of gas engine fuel, when utilizing industrial and domestic waste using the method of anaerobic digestion is proposed. The results of an experiment on obtaining biogas from sludge taken from the sludge site of the treatment facilities in Tambov are presented. Various characteristics of this type of waste have been determined, including the content of metal cations, oil products, carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons, radionuclides and pathogenic microorganisms. Wastes hazard class determined. It is shown that the content of hazardous components in the studied wastewater sludge is lower than the requirements of GOST. The composition and volume of emitted biogas have been determined. The main component is methane; oxygen (around 20%) and carbon dioxide (from 0.2 to 9.7%) are present as side components. The content of carbon monoxide (II), ammonia and hydrogen sulfide is less than 1%. It was found that the peak of the volumetric yield of methane occurs on days 9-11, depending on the ratio of sediment and silt. The maximum volume of biogas was obtained when excess activated sludge and sewage sludge were mixed for fermentation in a 1: 1 ratio. Utilization of sewage sludge and activated sludge will free up large land plots where sludge ponds and sludge maps are currently located. These lands can return to agricultural use.

Keywords: gas engine fuel, biogas, sewage sludge, excess activated sludge, anaerobic digestion.

Введение. Многочисленная сельскохозяйственная техника использует в качестве топлива продукты, получаемые переработкой нефти. Агропромышленный комплекс можно назвать одним из основных потребителей нефтяного дизельного топлива. Использование традиционного топлива уже сейчас влечёт за собой существенные проблемы, которые будут только усугубляться в будущем. Нефть – невозобновляемый источник энергии, сейчас перерабатываются всё более тяжёлые её виды, что требует увеличения числа стадий очистки и удорожает конечный продукт. Компоненты выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания попадают в окружающую нас среду, и она становится менее пригодной для жизни, прежде всего для производства продуктов питания. Увеличение стоимости топлив сказывается на цене сельскохозяйственной продукции, т.к. транспортные затраты в её себестоимости составляют в среднем 20 % [1].

Поэтому во многих странах ведётся активный поиск более экономичных и экологичных видов топлива. Желательно, чтобы исходным сырьём для этих видов топлива являлись возобновляемые ресурсы или отходы различных производств и жизнедеятельности человека. Парк сельскохозяйственных машин и стационарных установок в Российской Федерации требует обновления и модернизации. Новые трактора, комбайны и другие машины по надёжности, долговечности, экологическим характеристикам должны отвечать международным стандартам.

Уменьшить токсичность выхлопных газов может применение биодизельного топлива, синтезируемого из возобновляемого растительного сырья. Однако стоимость этого вида топлива пока выше, чем нефтяного аналога. Ещё одним вариантом снижения содержания токсичных веществ в отработавших газах при одновременном уменьшении стоимости топлива является использование газомоторного топлива. В настоящее время уже разработаны различные схемы переоборудования дизельного двигателя для того, чтобы он мог работать, используя газодизельный цикл [2]. Это позволит расширить сырьевую базу для производства моторных топлив и будет способствовать улучшению экологических характеристик двигателей и снижению затрат на производство сельскохозяйственной продукции. Сотрудники многих машинно-испытательных станций на основании многочисленных исследований сделали вывод о возможности и целесообразности применения альтернативных видов топлива в агрохозяйствах [3].

Для широкого применения газомоторного топлива на агропромышленных предприятиях необходимо создание газовых и газодизельных модификаций сельскохозяйственной техники, расширение инфраструктуры по заправке и обслуживанию такой техники и разработка нормативно-технической документации, регламентирующей все стороны использования нового вида топлива [4].

В настоящее время также актуален поиск новых способов получения биогаза, основным компонентом которого является метан. Нами предлагается способ утилизации промышленных и бытовых отходов с использованием метода анаэробного сбраживания.

В настоящее время на очистных сооружениях существует ряд стандартных способов переработки осадка городских сточных вод. Обычно их обезвоживают и направляют на иловые карты и илонакопители. Там происходит их биоразложение, которое происходит в течение довольно долгого времени. Иловые площадки отличаются простотой и лёгкостью эксплуатации, но часто регламент их эксплуатации не соблюдается, климатические факторы оказывают своё влияние на процесс обезвоживания, что приводит к неэффективному использованию земельных площадей. Поэтому неизбежно встаёт вопрос об утилизации осадков и избыточного ила с переполненных площадок, ведь необходимо складировать вновь образующиеся осадки.

Одним из вариантов является анаэробное сбраживание отходов с иловых площадок, в результате получается метансодержащий биогаз, который можно использовать как компонент газомоторного топлива. В настоящей работе исследован этот процесс на примере осадка сточных вод, образовавшихся на очистных сооружениях г. Тамбова.

Материалы и методы. Объекты исследования: образцы осадка бытовых сточных вод и избыточного активного ила, отобранные на площадке СХПК «Комсомолец» Тамбовского района.

Объём биогаза, выделившегося при сбраживании образцов определяли с помощью лабораторного лизиметра. С помощью термостата обеспечивали постоянную температуру экспериментального сбраживания 35⁰С. Три герметично закрытые емкости содержали смесь избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод в соотношении: 1:1, 5:1, 10:1. С помощью силиконовых шлангов каждую емкость с исходным сырьем соединили с герметично закрытой вытеснительной емкостью, заполненной 5 % раствором NaCl, которые размещались вне термостата. В свою очередь вытеснительные емкости, также с помощью силиконовых шлангов соединили с градуированными измерительными емкостями. Объем выделившегося биогаза измеряли методом вытеснения жидкости. Продолжительность эксперимента – 32 суток.

Анализ проб газа проводился с помощью хроматографа «ХРОМОС GX1000».

Результаты и их обсуждение. Существует ряд факторов, оказывающих влияние на ход процесса анаэробного сбраживания. Соответственно, те же факторы влияют на объём синтезируемого микроорганизмами метана. К таким факторам, безусловно, относятся температура реакционной массы, соотношение реагентов, компонентный и элементный состав ила и осадка, в том числе концентрация содержащихся в них катионов тяжелых металлов, ведь именно они снижают скорость анаэробного процесса. Объём, состав и физико-химические свойства выделяющегося при этом биогаза зависят от качественного и количественного состава осадка и избыточного активного ила.

Жизненный цикл микробов, обеспечивающих анаэробное брожение, возможен в довольно широком интервале температур: от 10 до 60 °С. Однако экспериментальные данные показывают, что оптимальная температура мезофильного брожения составляет 35 °С [5].

По литературным данным определены оптимальные параметры избыточного активного ила, направляемого на анаэробное сбраживание [6]. Так, влажность исходного сырья не должна превышать 98 %, а соотношение органических и неорганических компонентов должно находиться в границах 75-85 / 15-25 объёмных %. Верхняя граница концентрации твердых веществ в сырье для анаэробного сбраживания может колебаться в пределах от 55 % до 80 %. Такой показатель, как щёлочность исходной не должен быть ниже 1500 мг СаСО₃ на 1 л смеси и выше 5000 мг СаСО₃ на 1 л смеси. Содержание побочных продуктов брожения (летучих кислот) может находиться в интервале 600-1500 мг на 1 л смеси.

Очень важным фактором является соотношение питательных веществ, обеспечивающих жизнедеятельность микроорганизмов, наилучшее отношение углерода к азоту и фосфору составляет 21,4 : 5 : 1.

Экспериментально определённые характеристики осадка бытовых сточных вод, отобранного на иловых площадках очистных сооружений г. Тамбова, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика состава осадка сточных вод

Наименование показателя	Значение	Допустимое значение [7]
Агрегатное состояние и физическая форма	твёрдый	твёрдый
Массовая доля влаги, %	28-86	не нормир.
Массовая доля сухого вещества, %	14-72	не нормир.
Реакция среды, ед. рН	5,7-6,6	5,5-8,5
Массовая доля золы (неорг. вещества), %	32-84	не более 80
Потери при прокаливании (орг. вещества), %	16-68	не менее 20
Массовая доля, % на сух. в-во / % на факт. вл. общего фосфора	2,0 / 0,86	не ниже 1,5
общего азота	0,6 / 0,26	не ниже 0,6
общего кремния	50,1 / 21,54	–
общего алюминия	9,6 / 4,13	–
общего магния	1,6 / 0,69	–
общего кальция	3,8 / 1,63	–
общего железа	4,1 / 1,76	–
Валовые формы, мг/кг сух. в-ва / % на факт. вл.:		не более:
Ртуть	0,54/0,00005	15
Свинец	69,2/0,00498	500
Хром	18,1 / 0,0013	1000
Кадмий	1,53/0,00011	30
Медь	171 / 0,0123	1500
Никель	25 / 0,0018	400
Мышьяк	0,87/0,00006	20
Цинк	300 / 0,0216	3500
Подвижные формы, мг/кг сух. в-ва / % на факт. вл.:		не более:
Свинец	2,37/0,00017	6
Цинк	195 / 0,014	4
Никель	2,95/0,00021	3
Хром	0,15/0,00001	6
Нефтепродукты г/кг сух. в-ва/% на факт. вл.	0,43 / 0,00003	не более 30
Полициклические ароматические углеводороды, мг/кг	< 0,005	0,02
Метаболиты дихлордифенилтрихлорметилметана, мг/кг	< 0,007	0,14
Гептахлор, мг/кг	< 0,001	0,05
Изомеры гексахлорциклогексана, мг/кг	< 0,001	0,01
Техногенные радионуклиды (удельная активность), отн. ед.	<1	не более 1

Представленные данные показывают, что содержание опасных компонентов в осадке сточных вод, отобранном на очистных сооружениях г. Тамбова, ниже требований ГОСТ. В осадке не обнаружены патогенные микроорганизмы, жизнеспособные яйца гельминтов, личинки и куколки синантропных мух и цисты простейших, бактерии группы кишечной палочки. Химическое и биохимическое и потребление кислорода (ХПК и БПК) относят к одним из важнейших характеристик уровня загрязнения. По данным анализа, их величины в 6-10 раз ниже нормируемых.

Определено, что исследуемые отходы можно отнести к V классу опасности для окружающей природной среды. Следовательно, они могут быть подвергнуты дальнейшей переработке и площади, освобожденные в результате утилизации, можно использовать для сельскохозяйственных нужд.

Динамика метанообразования в течение 32 суток представлена на рисунке 1.

Рисунок 1 – Динамика метанообразования для смеси избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод в соотношениях: 1:1 – линия 1, 5:1 – линия 2, 10:1 – линия 3

На 2-е сутки становится заметным начало метанообразования при всех трёх соотношениях избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод. Так, при соотношении исходных компонентов 1:1 на вторые сутки выделилось 33 мл биогаза, при двух других соотношениях несколько меньше – 22 мл. Увеличение выхода биогаза наблюдалось в течение восьми-деяти суток для соотношения ила и осадка 1:1 и 5:1 и несколько дольше – до одиннадцати суток для соотношения 10:1.

С девятих суток наблюдается уменьшение объёма выделившегося биогаза для смеси избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод в соотношении 1:1 и 5:1. Для смеси избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод в соотношении 10:1 оно наблюдается с двенадцатых суток.

На рисунке 2 представлена динамика увеличения количества метанообразования из избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод за 32 суток.

Самый большой объёма биогаза был получен при сбраживании смеси активного ила и осадка бытовых сточных вод в соотношении 1:1, что составило 1357 мл, самый маленький объём был достигнут при соотношении тех же компонентов 10:1, что составило 1041 мл. Различия объёма выделившегося биогаза можно объяснить тем, что при большем содержании активного ила в смеси присутствует больше ингибирующих компонентов.

После завершения экспериментального сбраживания наблюдалось расслоение содержимого каждой ёмкости на осветленную жидкость и осадок.

Рисунок 2 – Динамика увеличения количества метанообразования смеси активного ила и осадка бытовых сточных вод за 32 суток в соотношениях: 1:1 – линия 1, 5:1 – линия 2, 10:1 – линия 3

В ходе эксперимента разложилось 60-70 % органических соединений, который были загружены изначально.

В таблице 2 представлены результаты измерения массовой концентрации метана при выходе биогаза на 24 сутки.

Таблица 2 – Результаты измерения концентрации метана при выходе биогаза на 24 сутки в соотношениях избыточного активного ила (ИАИ) и осадка сточных вод (ОСВ) 1:1, 5:1, 10:1

Соотношение исходного сырья	Концентрация, мг/м ³
ОСВ и ИАИ 1:1	95722,927
ОСВ и ИАИ 1:5	94925,887
ОСВ и ИАИ 1:10	93697,728

Максимальная массовая концентрация выхода биогаза наблюдается в емкости в соотношении 1:1 избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод.

По данным хроматографического анализа основным компонентом биогаза является метан, кроме того, в газовой смеси присутствуют кислород (около 20 %) и углекислый газ (от 0,2 до 9,7 %). Содержание токсичных для окружающей среды примесей, например, сероводорода, аммиака и оксида углерода (II) не превышает 1 %. Оксиды азота отсутствуют.

Заключение. Показано, что получение биогаза путём утилизации избыточного активного ила и осадка бытовых сточных вод позволяет освободить большие земельные участки, на которых в настоящий момент находятся илонакопители и иловые карты. Эти земли могут вернуться в сельскохозяйственный оборот.

Установлено, что биогаз, полученный в результате анаэробного сбраживания отходов, после дополнительного концентрирования, может быть использован как компонент газомоторного топлива, так как основным его компонентом является метан.

Установлено, что в качестве побочных компонентов присутствуют кислород (около 20 %) и углекислый газ (от 0,2 до 9,7 %). Содержание сероводорода, аммиака и оксида углерода (II) менее 1 %.

Установлено, что пик объемного выхода метана наступает на 9-11 сутки в зависимости от соотношения осадка и ила.

Для получения наибольшего объема биогаза необходимо смешивать избыточный активный ил и осадок бытовых сточных вод в соотношении 1:1.

Список литературы

1. Al-Maidi A.A.H., Chernetsov D.A., Vdovina E.S. Study of a combined device to reduce the toxicity of ex-haust gases of diesel engines, agricultural technology // *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 2019. – № 50(5). – P. 1259-1268.
2. Аль-Майди А.А.Х., Чернецов Д.А., Родионов Ю.В., Селиванова П.И. Перспективы переоборудования сельскохозяйственных дизельных машин на газомоторное топливо // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*, 2017. – №4 (66). – С. 200-206.
3. Ефремов С.Б., Гусев В.Г. Газомоторный опыт // *Агротехника и технологии*, 2015. – № 5. – С. 50-54.
4. Савельев Г.С., Кочетков М.Н., Овчинников Е.В., Коклин И.М. Использование природного газа в качестве моторного топлива для сельскохозяйственной техники // *Транспорт на альтернативном топливе*, 2014. – № 1 (37). – С. 40-52.
5. А.А. Кадысева, Р.М. Гильмутдинов, А.С. Тарапатова, В.В. Токарев, С.А. Безухова. Влияние температуры на анаэробное сбраживание органического субстрата // *Вестник Омского государственного аграрного университета*, 2013. – № 3(11). – С. 35-38.
6. Байбурский В., Паслен В., Шаповалов В. Биоэнергетика. Альтернативные энергетические системы: теперь и в России // *The Chemical Journal*. – 2007. – № 5. – С. 44-48.
7. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 10 с.

References

1. Al-Maidi A.A.H., Chernetsov D.A., Vdovina E.S. Study of a combined device to reduce the toxicity of ex-haust gases of diesel engines, agricultural technology // *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 2019. – № 50(5). – P. 1259-1268.
2. Al'-Majdi A.A.H., Chernecov D.A., Rodionov Ju.V., Selivanova P.I. Perspektivy pereoborudovaniya sel'skhozajstvennyh dizel'nyh mashin na gazomotornoe toplivo // *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*, 2017. – №4 (66). – S. 200-206.
3. Efremov S.B., Gusev V.G. Gazomotornyj opyt // *Agrotehnika i tehnologii*, 2015. – № 5. – S. 50-54.
4. Savel'ev G.S., Kochetkov M.N., Ovchinnikov E.V., Koklin I.M. Ispol'zovanie prirodnogo gaza v kachestve motornogo topliva dlja sel'skhozajstvennoj tehnik // *Transport na al'ternativnom toplive*, 2014. – № 1 (37). – S. 40-52.
5. A.A. Kadyseva, R.M. Gil'mutdinov, A.S. Tarapatova, V.V. Tokarev, S.A. Bezuhova. Vlijanie temperatury na anajerobnoe sbrazhivanie organicheskogo substrata // *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013. – № 3(11). – S. 35-38.
6. Bajburskij V., Paslen V., Shapovalov V. Biojenergetika. Al'ternativnye jenergeticheskie sistemy: teper' i v Rossii // *The Chemical Journal*. – 2007. – № 5. – S. 44-48.
7. GOST R 17.4.3.07-2001. Ohrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k svojstvam osadkov stochnyh vod pri ispol'zovanii ih v kachestve udobrenij. M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2001. – 10 s.

Сведения об авторах**Принадлежность к организации**

Романцова Светлана Валерьевна – кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный университет им Г.Р. Державина», Россия, г. Тамбов, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Якунина Ирина Владимировна – кандидат химических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: yakunina-iv@mail.ru.

Галкин Павел Александрович – кандидат технических наук, доцент Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru.

Милосердов Алексей Михайлович – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», Россия, г. Тамбов, e-mail: aleksej.miloserdov.96@mail.ru.

Author credentials**Affiliations**

Romantsova Svetlana – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Tambov State University named after G.R.

Derzhavin», Russia, Tambov, e-mail: svromantsova@yandex.ru.

Yakunina Irina – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: yakunina-iv@mail.ru.

Galkin Pavel – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: arhsit@nnn.tstu.ru.

Alexey Miloserdov – Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Tambov State Technical University”, Russia, Tambov, e-mail: aleksej.miloserdov.96@mail.ru.

Поступила в редакцию (Received): 28.08.2020 Принята к публикации (Accepted): 22.10.2020