

*На правах рукописи*

**ЕВСТАФЬЕВ Денис Петрович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ  
АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БИООТХОДОВ  
ПРИМЕНЕНИЕМ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА КОНТРОЛЯ pH**

Специальность 05.20.02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Саратов 2015**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»

**Научный руководитель – Шаруев Николай Константинович,**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты: Гришин Иван Иванович,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Электротехника,  
электрооборудование и автоматика»  
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный  
агротехнологический университет им. П.А. Костычева»

**Вохмин Вячеслав Сергеевич,**  
кандидат технических наук, доцент  
кафедры «Электрические машины и  
электрооборудование» ФГБОУ ВПО  
«Башкирский государственный аграрный  
университет»

**Ведущая организация –** ФГБОУ ВПО «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия»

Защита диссертации состоится «27» марта 2015 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» по адресу: 410056, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» и на сайте [www.sgau.ru](http://www.sgau.ru).

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, e-mail: [chekmarev.v@yandex.ru](mailto:chekmarev.v@yandex.ru).

Автореферат диссертации разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Чекмарёв  
Василий Васильевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** По некоторым оценкам только в ЕС выработка биогаза достигает 14,6 млрд м<sup>3</sup> в год и непрерывно увеличивается с ростом вновь вводимых биогазовых установок (БГУ). Россия имеет огромный потенциал производства биогаза, но пока сильно отстаёт по количеству БГУ. Сдерживающими факторами являются сырьевая экономика и отсутствие доступных и эффективных средств контроля и регулирования параметров технологического процесса (ТП).

Показатель кислотности (щёлочности) среды в биогазовой технологии переработки биоотходов является фактором, связывающим основные параметры ТП, такие, как температурный режим, влажность, дисперсность, частота и продолжительность перемешивания. Изменение перечисленных параметров приводит к колебаниям уровня рН, что оказывает угнетающее влияние на жизнедеятельность микроорганизмов, и тем самым замедляет процесс выделения биогаза. Известно, что процесс переработки биоотходов протекает в несколько этапов, каждому из которых соответствует своё оптимальное значение рН. Экспериментально установлено, что отклонение показателя от нормы ( $pH = \pm 0,1$ ) для любого состава биоотходов замедляет процесс образования биогаза и даже останавливает его, увеличивая продолжительность цикла и снижая удельный выход биогаза и качество эффлюента. Таким образом, дистанционный непрерывный контроль за уровнем рН для его своевременной стабилизации с помощью нейтрализаторов среды позволит интенсифицировать ТП.

Традиционные методы и средства измерения рН не позволяют дистанционно с необходимой точностью и быстродействием контролировать рН биоотходов. Диэлькометрический метод привлекает к себе внимание относительной простотой реализуемости, возможностью дистанционного и непрерывного обеспечения измерений, низкой стоимостью в сочетании с высокими метрологическими характеристиками, широкими возможностями совершенствования. Однако данный метод имеет ряд недостатков, связанных с влиянием на результат измерения таких факторов, как температура, влажность, дисперсность и др. Таким образом, при реализации метода возникает задача устранения или сведения к минимуму погрешностей, связанных с влиянием указанных факторов. Задача может быть решена за счёт

использования первичных преобразователей, выполненных по трехточечной схеме, и применения высокочастотных автогенераторных измерительных преобразователей (АИП). Поэтому создание электротехнического устройства контроля (ЭУК) рН биоотходов является актуальной научно-технической задачей.

Работа выполнялась в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники, утверждённых Указом Президента РФ от 07.07.2011 № 899 – «Технологии новых и возобновляемых источников энергии...».

**Степень разработанности темы.** На основании фундаментальных трудов по электрохимии С.П.Л. Сёренсена, Б.П. Никольского, М.М. Шульца, А.А. Белюстина, Р.Г. Бейтса и др. разработаны теории стеклянного электрода и созданы первые рН-метры.

Проблемы разработки и исследования системы автоматического регулирования концентрации ионов водорода в питательном растворе рассмотрены в работах Е.Н. Живописцева.

Аналитическим и экспериментальным исследованиям электротехнических преобразователей, имеющих различное исполнение и вид конденсатора, посвящены работы М.М. Горбова, Ю.К. Зыбцева, Э.В. Кузьмина, П.П. Гришина, И.И. Гришина и др.

Вопросы исследования основных параметров сельскохозяйственных продуктов с помощью автогенераторных самобалансирующихся трансформаторных мостов раскрыты в трудах В.П. Парусова, Г.П. Ерошенко, Н.К. Шаруева и др.

**Цель работы** – повышение эффективности технологии анаэробной переработки биоотходов за счёт непрерывного и дистанционного измерения рН применением электротехнического устройства контроля с целью своевременной стабилизации его уровня добавлением раствора нейтрализатора.

**Задачи исследования:** провести анализ существующих способов определения рН и обосновать применение диэлькометрического метода при контроле рН биоотходов; разработать модель измерительной ячейки для контроля рН биоотходов; обосновать параметры, разработать измерительную схему электротехнического устройства контроля рН и провести тарировочные испытания его опытного образца; выполнить испытания электротехнического устройства контроля рН в лабораторных и производственных условиях и оценить технико-экономическую эффективность его применения в биогазовых установках.

**Научная новизна** диссертационного исследования заключается в:

разработке модели измерительной ячейки, позволяющей контролировать рН биоотходов; разработке конструкции первичного преобразователя с оптимальными геометрическими параметрами, и электрической схемы вторичного преобразователя электротехнического устройства контроля рН на частотах от 1 до 5 МГц; разработке методики контроля рН при подготовке и анаэробном сбраживании биоотходов, позволяющей получать стабильный выход биогаза и эффлюент с улучшенными агрохимическими показателями.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в: разработке модели измерительной ячейки с графическим отображением электрофизических процессов, происходящих в биомассе при воздействии электрического поля и её схемы замещения, которые позволяют аналитически выразить связь рН с составляющими биомассы; определении аналитических зависимостей рН от проводимости среды; разработке первичного преобразователя, который из-за оригинального технического исполнения подвержен засорению в меньшей степени; создании нового электротехнического устройства контроля рН биоотходов, обеспечивающего сокращение продолжительности цикла сбраживания с 25 до 18 сут. по сравнению с использованием потенциометрического метода, повышенную стабильность показаний при погрешности измерений не более 0,1 ед.; разработке методики измерений рН с помощью электротехнического устройства, позволяющей за счёт непрерывного и дистанционного контроля за его уровнем своевременно добавлять раствор нейтрализатора в реактор биогазовой установки, что способствует повышению удельного выхода биогаза на 6–12 % с 1 м<sup>3</sup> его объёма при одновременном получении эффлюента с улучшенными агрохимическими показателями; разработке промышленной установки для переработки органических отходов на биогаз и биогумус (патент RU 104286 U1). Годовой экономический эффект от применения ЭУК рН в БГУ объемом реактора 21 м<sup>3</sup> по приведённым затратам составляет около 48 тыс. руб.

Производственные испытания электротехнического устройства контроля рН в БГУ с объёмом реактора 1,25 м<sup>3</sup> в ЗАО «Агрофирма «Волга» Марковского района Саратовской области показали, что предлагаемый способ интенсификации биопроцесса позволяет получать стабильный биогаз в диапазоне 3,55–3,96 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> объёма реактора при использовании смеси навоза КРС и отходов свиноводства. Испытание полученного эффлюента в УНПК «Агроцентр» Заводского района г. Саратова показали, что по сравне-

нию с использованием минеральных удобрений срезка цветов увеличилась почти на 30 %.

**Методология и методы исследования.** В работе использованы аналитические и экспериментальные методы исследования для раскрытия закономерностей поведения ионов водорода и гидроксид-ионов в электрическом поле рабочей зоны первичного преобразователя. В экспериментальных исследованиях использованы современные средства измерительной техники.

**Положения**, выносимые на защиту:

модель измерительной ячейки, позволяющая измерять рН на фоне проводимости за счет других химических веществ, растворённых в дисперсионной среде;

параметры электротехнического устройства контроля рН, его схема измерения и тарировочные испытания;

экспериментальные зависимости рН от проводимости среды с учетом температурных режимов;

оценка влияния способа дистанционного непрерывного контроля уровня рН биоотходов применением разработанного устройства с целью своевременной нейтрализации его колебаний на показатели эффективности работы биогазовой установке.

**Степень достоверности и апробация результатов** обеспечена достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных данных, подтверждаются экспериментальными исследованиями, выполненными на действующей биогазовой установке.

Основные положения диссертации и её результаты были обсуждены и получили положительную оценку: на отчётных научно-практических конференциях профессорско-преподавательского состава СГАУ им. Н. И. Вавилова (Саратов, 2009–2014; на Конкурсе научно-исследовательских проектов молодых ученых СГАУ им. Н. И. Вавилова (Саратов, 2011, 2014); на II, III этапах Всероссийского конкурса на лучшую научную работу среди студентов, аспирантов и молодых учёных вузов Минсельхоза России (Уфа, Саратов, 2011, 2012); на Выставке научно-технического творчества молодых учёных Саратовской области в рамках Всероссийского фестиваля науки – 2012 (Саратов, 2012) и др. Опытный образец ЭУК рН был удостоен бронзовой медали и диплома III степени на VI и грамоты на VIII Саратовских Салонах изобретений, инноваций и инвестиций (Саратов, 2011 и 2013 соответственно).

По результатам исследования опубликовано 14 печатных работ, в т. ч. 4 в рецензируемых научных изданиях; патент на по-

лезную модель РФ. Общий объём публикаций – 3,84 п. л., из которых 1,81 п. л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, заключения, списка литературы и приложений. Изложена на 157 страницах, содержит 18 таблиц, 36 рисунков и 11 приложений. Список литературы включает 178 наименований, в том числе 6 – на иностранном языке.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследований»** приведена общая характеристика проблемы, выбрано направление исследований и намечены пути решения основных задач. Рассмотрены теоретические основы биогазовой технологии, проведён анализ параметров, характеризующих процесс анаэробного сбраживания, физико-механических свойств и химического состава биоотходов. Выявлено, что изменение основных параметров биопроцесса приводит к колебаниям уровня рН, что угнетающе влияет на жизнедеятельность бактерий, вырабатывающих биогаз. Таким образом, параметр рН характеризует динамику протекания ТП, показана необходимость и важность её контроля как на этапе подготовки биоотходов, так и во время ферментации. Рассмотрены методы измерения рН, их достоинства и недостатки, а также технические средства для их реализации. Доказано, что контроль рН необходимо производить непрерывно в соответствии с технологическим функционально-временным режимом поэтапного сбраживания.

Наиболее перспективным методом дистанционного контроля рН биоотходов является высокочастотная диэлькометрия. Основное преимущество выбранного метода состоит в том, что его можно применить при контроле рН жидких веществ с комплексной проводимостью порядка  $10^{-3} \dots 10^{-2} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$  с точностью  $\pm 0,1$  ед. Особенность данного метода с использованием переменного тока повышенной частоты (1–100 МГц) заключается в возможности контроля качественного и количественного состава дисперсных фаз, растворённых в дисперсионной среде.

**Во второй главе «Теоретическое обоснование параметров электротехнического устройства контроля рН»** рассмотрен

объект исследования, приведено аналитическое описание теории измерения pH биоотходов диэлькометрическим методом с помощью разработанной модели измерительной ячейки, а также обоснованы параметры устройства, обеспечивающие необходимую точность и быстроту измерений. Решение поставленных задач в общем виде связано с трудностью учёта многочисленных факторов, влияющих на электрические явления в рабочей зоне первичного преобразователя (ПП), электрофизических свойств измеряемой среды, а также с тем, что биоотходы – сложные многокомпонентные системы. Для исследования процессов, протекающих в рабочей зоне ПП с биоотходами принята обобщённая схема объекта исследования, показанная на рисунке 1.

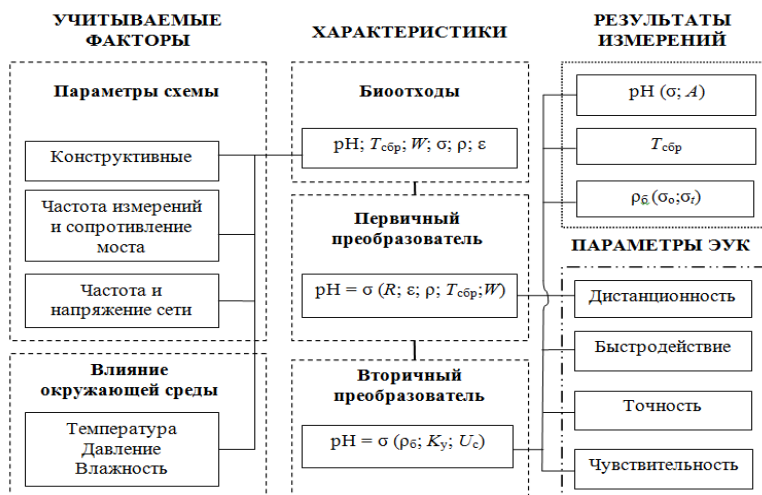


Рисунок 1 – Структурная схема объекта исследования:  $A$  – амплитуда выходного напряжения, мВ;  $\sigma$  – проводимость биомассы, См/м;  $\omega$  – частота измерений, Гц;  $T_{сбр}$  – температура биомассы, °С;  $\rho_B$  – удельная плотность биомассы, кг/м<sup>3</sup>;  $K_y$  – коэффициент усиления вторичного преобразователя;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость биомассы;  $W$  – влажность биомассы, %;  $\sigma_0$  – удельная проводимость при исходных параметрах ( $W; T_{сбр}; \rho_B$ ), См/см;  $\sigma_t$  – проводимость термистора, См;  $U_c$  – напряжение питания схемы, В.

Биоотходы относятся к дисперсным системам, состоящим из сплошной – дисперсионной среды и двух или более фаз, распределённых в виде отдельных частиц в ней. В дисперсной системе частички дисперсной фазы состоят не из отдельных молекул, а из их конгломератов, поэтому основной их признак – нераство-



римость или малая растворимость вещества дисперсной фазы в дисперсионной среде. Вода, благодаря растворённым в ней солям, кислотам и щелочам, служит проводником с удельной проводимостью  $\sigma$ , См/м. Поэтому при конструировании измерительной ячейки применены специальные меры, снижающие шунтирующее влияние проводимости: выбор оптимального геометрического фактора, частичная изоляция высокопотенциальных электродов в рабочей зоне измерения преобразователя. Для определения рН биоотходов выбранным методом требуется смоделировать электрофизические процессы, происходящие в биомассе при воздействии на неё электрического поля. Идеализированная модель измерительной ячейки представлена на рисунке 2, а.

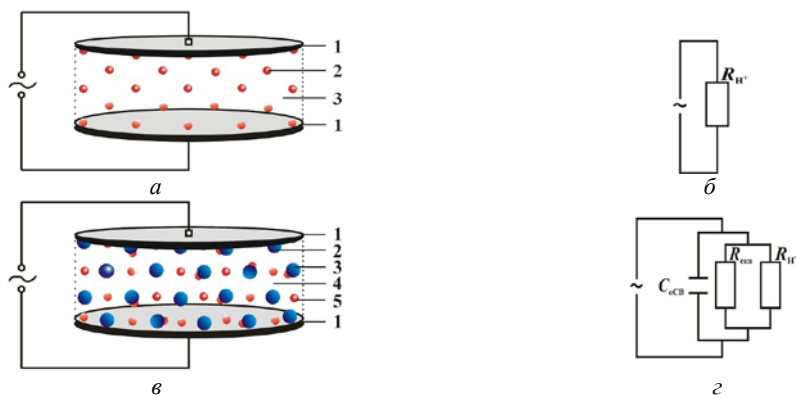


Рисунок 2 – Модель измерительной ячейки: а – идеализированная: 1 – обкладки конденсатора; 2 – ион водорода; 3 – дистиллированная вода; б – схема замещения; в – реальная: 1 – обкладки конденсатора; 2 – недиссоциировавшие молекулы; 3 – ион водорода; 4 – вода с растворёнными в ней солями; 5 – гидроксид-ион; г – схема замещения

Под дисперсной фазой подразумевается присутствие только ионов водорода  $H^+$ , равномерно распределённых в дисперсионной среде, в качестве которой принята дистиллированная вода. Таким образом, схема замещения идеализированной модели представляет собой резистор  $R_{H^+}$ , характеризующий проводимость  $\sigma$  ионов водорода (рисунок 2, б).

Удельная электропроводность  $\sigma$  биоотходов – величина, обратная сопротивлению в рабочей зоне первичного преобразователя, делённая на его геометрический фактор:

$$R_{H^+} = 1/(\sigma d) \quad (1)$$

где  $d$  – зазор между пластинами в рабочей зоне ПП, м.

Известно, что измеренное сопротивление, обусловленное этой удельной электропроводностью, не зависит от частоты ниже 10 МГц. Но с её увеличением падает, приводя к росту потерь в результате релаксационных явлений. Появление ионной проводимости, в том числе водородных ионов  $H^+$ , существенно меняет частотные характеристики. При повышении температуры на 1 °С удельная проводимость увеличивается на 2–2,5 % за счёт уменьшения гидратации ионов и вязкости биоотходов.

При исследовании электрофизических свойств биоотходов с высокой активной проводимостью используют удельную комплексную проводимость:

$$\bar{\sigma} = \sigma_a + j\sigma_p, \quad (2)$$

где  $\sigma_a$ ,  $\sigma_p$  – активная и реактивная составляющие удельной проводимости.

Здесь  $\sigma_a$  определяют по измерению выделенной активной мощности  $P_0$  в рабочей зоне первичного преобразователя:

$$P_0 = J_a E = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 = \sigma_a E^2, \quad (3)$$

где  $J_a$  – плотность активного тока, А/м<sup>2</sup>;  $E$  – напряжённость электрического поля, В/м;  $\omega$  – угловая частота, с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^3$ , Ф/м;  $\varepsilon''$  – фактор потерь (действительная часть эквивалентной) диэлектрической проницаемости;  $\sigma_a$  – активная проводимость, Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>.

$$\sigma_a = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'', \quad (4)$$

$$\text{С другой стороны: } \sigma_a = \sigma_{\text{скв}} + \sigma_{\text{а рел}}, \quad (5)$$

$$\text{или } \sigma_a = J_{\text{скв}}/E + [\Sigma C_i \omega^2 \tau_i] / [1 + (\omega \tau_i)^2], \quad (6)$$

где  $\sigma_{\text{скв}}$  – сквозная удельная проводимость (в нашем случае удельная электропроводность биоотходов), не зависящая от частоты электромагнитного поля;  $\sigma_{\text{а рел}}$  – удельная активная проводимость, обусловленная релаксационными процессами поляризации, в частности ионной, которая зависит от частоты и увеличивается с повышением температуры;  $C_i$  – ёмкость схемы замещения первичного преобразователя для  $i$ -го вида поляризации;  $\tau_i$  – постоянная времени  $i$ -го вида поляризации;  $J_{\text{а скв}}$  – плотность тока сквозной проводимости, А/м<sup>2</sup>.

Исследования показали, что на малых частотах плотность тока сквозной проводимости определяется в основном ионным характером дисперсионной среды, а при повышении температуры с 20 до 70 °С сквозная удельная проводимость линейно повыша-

ется, что значительно упрощает построение реальной модели измерительной ячейки (рисунок 2, в), для данной технологии, характеризуемой тремя температурными режимами:

$$\sigma_{\text{СКВ}} = f(T). \quad (7)$$

Влажность является определяющим фактором подготовки биоотходов к анаэробному сбраживанию. Причём удельная проводимость биоотходов, разбавленных водой (биомасса), зависит от местных условий, преимущественно составом растворимых солей, и она будет приближаться по значению к проводимости  $\sigma$  исходной воды, т. к. влажность биомассы для различных смесей находится в диапазоне  $W = 78\text{--}90\%$ , при этой рН биомассы также будет стремиться к рН используемой воды. Следовательно, в качестве разбавителя необходимо применять воду с нейтральной рН. При этом  $\sigma$  на стадии подготовки будет линейно зависеть от влажности в диапазоне от исходной  $W_{\text{исх}}$  до оптимальной  $W_{\text{опт}}$ .

Таким образом, в полученной биомассе (см. рисунок 2, в) присутствуют: диэлектрические частицы органического сухого вещества оСВ (целлюлоза, остатки корма, щетина и т.п.) с размерами частиц не более 0,5–3 мм; растворенные соли, определяющие сквозную проводимость биомассы  $R_{\text{СКВ}}$ ; недиссоциировавшие молекулы и гидроксид-ионы. Схема замещения реальной модели (рисунок 2, г) представляет собой плоский конденсатор, определяющий диэлектрическую проницаемость органического сухого вещества  $C_{\text{оСВ}}$ , и проводимости, обусловленные присутствием ионов водорода  $R_{\text{H}^+}$  и растворённых солей  $R_{\text{СКВ}}$ . Следовательно, при таких допущениях и требованиях к режимным параметрам биогазовой технологии будет иметь место линейная зависимость:

$$\sigma = f(\text{рН}). \quad (8)$$

На основании принятых допущений по диапазонам изменения температуры, частоты и влажности формула (8) примет следующий параметрический вид:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha(T - T_0) + [\beta_0 + \gamma(T - T_0)](W - W_0) + [\zeta_0 + \psi(T - T_0)](\text{рН} - \text{рН}_0), \quad (9)$$

где  $\sigma_0$  – удельная проводимость при исходных: влажности  $W_0$ , температуре  $T_0$  и концентрации водородных ионов  $\text{рН}_0$ ;  $\beta_0$  – коэффициент, характеризующий зависимость от содержания влажности при  $T_0$ ;  $\zeta_0$  – коэффициент, характеризующий зависимость от рН при  $T_0$ ;  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\psi$  – коэффициенты, учитывающие изменения угла наклона при различных температурах.

Выразим рН из формулы (9):

$$\text{рН} = \text{рН}_0 + \frac{\sigma - \sigma_0 + \alpha(T - T_0) + [\beta_0 + \gamma(T - T_0)](W - W_0)}{\zeta_0 + \psi(T - T_0)}, \quad (10)$$

Конструкция первичного преобразователя должна обеспечивать отсутствие поверхностных утечек, краевых искажений электрического поля во всём диапазоне изменения рабочих частот. Анализ первичных преобразователей с плоскопараллельными электродами показывает, что преобразователи с двумя защитными электродами, называемыми трёхточечными конденсаторами, обладают большей относительной чувствительностью по сравнению с преобразователями без защитных электродов.

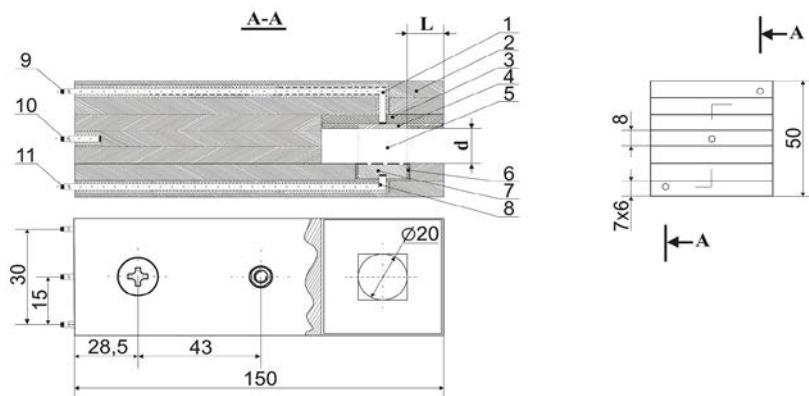


Рисунок 3 – Первичный преобразователь: 1 – экранированный провод ВПЭ; 2 – корпус; 3 – изоляция; 4 – высокопотенциальный электрод (ВПЭ); 5 – рабочая зона первичного преобразователя; 6 – изоляция НПЭ; 7 – низкопотенциальный электрод (НПЭ); 8 – экранированный провод НПЭ; 9 – вывод ВПЭ; 10 – вывод экрана; 11 – вывод НПЭ

Это достигается за счёт уменьшения паразитных краевых ёмкостей, а также снижения значения начальной ёмкости преобразователя и приращения ёмкости в результате внесения первичного преобразователя в биоотходы. Первичный преобразователь (рисунок 3) представляет собой трёхточечный помехозащищённый конденсатор, состоящий из двух электродов 4 и 7 в виде пластин, закреплённых параллельно друг другу на расстоянии  $d$ .

В качестве материала для изготовления первичного преобразователя нами выбрана нержавеющая сталь, создающая сравнительно малое поляризационное сопротивление ( $\Delta R_s = 2,1 \text{ Ом}$ ), и не образующая поверхностных плёнок. Электроды скреплены анкерными болтами с потайными головками  $8 \times 50 \text{ мм}$  и гайками, углубленными в металл. Низкопотенциальный электрод изолирован вокруг прокладкой из фторопласта-4 марки ПН. Электро-

ды образуют между собой пространство, заполняемое биомассой. Низкопотенциальный электрод 7 выполнен в виде цилиндра, с внешней стороны он окружен экранным электродом 2. Ширину охранной зоны  $L$  выбирают, исходя из требований равномерности поля в рабочей зоне 5 преобразователя. При  $L = d$  неравномерность поля не более 0,1 %. Внешняя часть ВПЭ 4, покрытая сверху изоляционным материалом 3, выполнена равной по диаметру НПЭ 7. Изоляционное покрытие устраняет шунтирующее влияние проводимости контролируемой биомассы, находящейся вне рабочей зоны преобразователя 5. Сам по себе корпус 2 является экраном, соединённым с корпусом измерительного устройства. Выводы ВПЭ 9, НПЭ 11 и экрана 10 уложены в пазы и залиты силиконовым герметиком. Поскольку сквозная удельная проводимость на частотах ниже 10 МГц равна удельной проводимости исходной воды и не влияет на удельную проводимость ионов водорода – открывается возможность измерения рН на этих частотах с помощью АИП. Электрическая схема измерения рН, собранная на базе АИП, представлена на рисунке 4.

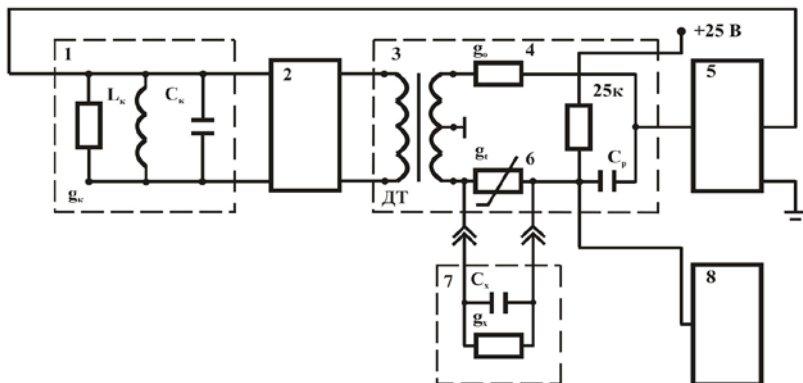


Рисунок 4 – Электрическая схема контроля рН биотходов на базе АИП:  
 1 – колебательный контур; 2 – многокаскадный широкополосный усилитель;  
 3 – дифференциальный трансформаторный мост; 4 – резистор сравнения;  
 5 – автогенератор; 6 – термистор; 7 – первичный преобразователь;  
 8 – милливольтметр

Поскольку сквозная проводимость исходных биотходов превышает предельную для АИП величину  $2 \cdot 10^{-2}$  См, была произведена реконструкция ПП: увеличен зазор между электродами в его рабочей зоне, сделан расчёт защитных и охранных электро-

дов. Однако это привело к снижению чувствительности АИП, что потребовало увеличения рабочей частоты до 5 МГц. Кроме того, предложена схема измерения удельной проводимости субстрата не по амплитуде выходного напряжения, а путём измерения сопротивления термистора на постоянном токе  $J_T = 1$  мА.

При этом применение серийных милливольтметров на базе аналого-цифровых преобразователей позволило существенно упростить измерительную схему. Таким образом, теоретические исследования позволили разработать модель измерительной ячейки, описать процессы, происходящие в биоотходах при воздействии электрического поля, установить параметры ПП и электрической схемы измерения, определиться с элементной базой ЭУК рН.

**В третьей главе «Экспериментальные исследования электротехнического устройства контроля рН в лабораторных и производственных условиях»** проведен анализ экспериментальных результатов и выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных. Цель эксперимента – получение зависимостей  $pH = f(\sigma)$  и  $pH = f(T)$ . Пробы навоза КРС и свиней в свежем виде забирались с животноводческой фермы ЗАО «Агрофирма «Волга». Была создана экспериментальная установка (рисунок 5).

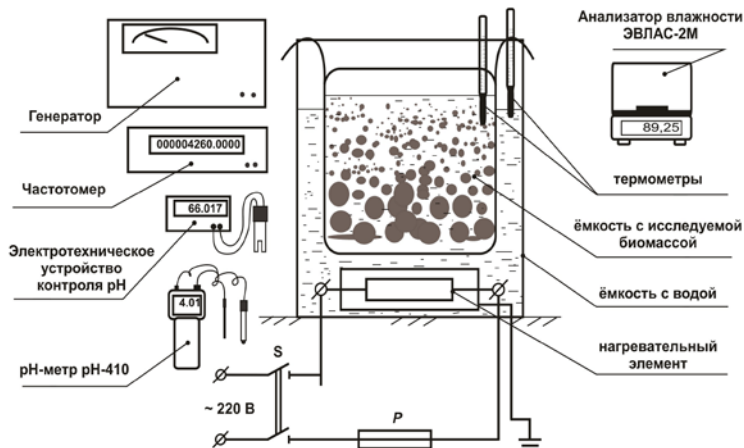


Рисунок 5 – Схема экспериментальной установки для тарирования ЭУК рН

Принцип действия экспериментальной установки заключается в следующем. На ровную поверхность устанавливается ёмкость, в которую наливается вода, выполняющая функцию водяной рубашки. Вода доводится до температуры, при которой биомасса

выходит на нужный температурный режим, электронагревателем, работающим от сети переменного тока. Равномерность нагрева по всему объёму и сведение к минимуму влияния седиментации создаются за счёт периодического перемешивания биоотходов. Запись результатов измерений производится после выравнивания плотности. Регистрация температуры нагрева при имитации требуемых температурных режимов работы БГУ осуществляется термометрами, помещёнными в ёмкости с водой и биоотходами.

Для определения влияния температуры на измерение и характер изменения рН в процессе подготовки биомассы к анаэробному сбраживанию (а также на 1-м этапе ферментации) в опыте была предусмотрена возможность поддержания трёх температурных режимов сбраживания:  $t \leq 25^\circ\text{C}$  – при психрофильном;  $35 \leq t \leq 37^\circ\text{C}$  – при мезофильном и  $55 \leq t \leq 57^\circ\text{C}$  – при термофильном. Для определения влажности субстрата в опытах был использован анализатор влажности «ЭВЛАС-2М». Перед загрузкой биоотходов в реактор точно измеряли их массу. В нашем случае масса пробы  $M_{\text{пр}}$  исходного сырья при загрузке в ёмкость для последующего определения рН составляет 300 г.

Эксперимент начинали с определения рН в исходном субстрате и воде, которую в последующем добавляли в исходное сырьё, доводя его влажность до оптимальных технологических параметров (навоз КРС  $W = 90\%$ ; птичий помёт –  $W = 78\%$ ; отходы свиноводства –  $W = 85\%$ ; навоз КРС + отходы свиноводства –  $W = 90\%$ ). Показания среды с ЭУК рН снимали многократно. Полученный массив информации обрабатывали методами математической статистики.

Первичный преобразователь ЭУК рН характеризуется стойкостью к агрессивным средам, что позволяет монтировать его на внутренних стенках, как ёмкости предварительной подготовки биомассы, так и реактора БГУ. При этом устройство имеет следующие характеристики: время подготовки к работе – не более 1 мин, диапазон рабочих частот – 1–5 МГц; время проведения измерений – не более 1–3 с. Результаты измерений отображаются на цифровом табло. Частота индикации результатов измерения – 100 Гц. ЭУК калибруется по стандарт-титрам, работает от сети 220 В, 50 Гц. Контрольную проверку рН смеси навоза КРС и отходов свиноводства проводили потенциометрическим методом по ГОСТ 27979–88. Навоз КРС имел рН от 7,1 до 9,7; отходы свиноводства рН от 5,6 до 6,5. По полученным данным были построены кривые (рисунки 6, 7).

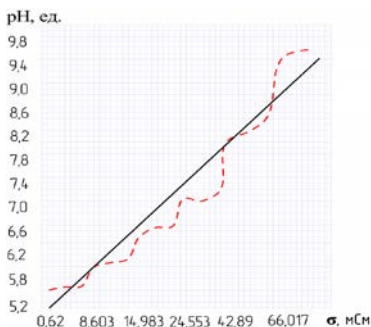


Рисунок 6 – Зависимость  $\sigma = f(\text{pH})$ :  
 — теоретическая;  
 - - - эмпирическая

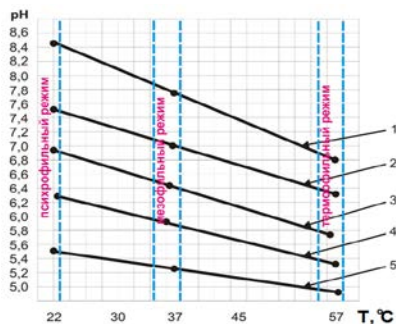


Рисунок 7 – Влияние температурного режима сбраживания на показатель  $\text{pH} = f(T)$ : 1 – овечий помёт; 2 – навоз КРС; 3 – смесь биоотходов; 4 – птичий помёт; 5 – отходы свиноводства

С учётом того, что при подготовке биоотходов к анаэробному сбраживанию влажность доводится до требуемого значения при  $T = \text{const}$ , то формула (11) примет следующий вид:

$$\text{pH} = (\sigma - A)/B, \quad (12)$$

где  $A = [\sigma_0 + \alpha(T - T_0)] - [\zeta_0 + \psi(T - T_0)] \text{pH}_0$ ;  $B = \zeta_0 + \psi(T - T_0)$ .

Численные значения коэффициентов А и В, вычисленные с учетом использования теоретически чистой воды с известными и постоянными для данного источника значениями  $\sigma_0$  и рН для трёх температурных режимов сбраживания, представлены в таблице.

Таблица – Приведение данных, снятых с блока индикации ЭУК, к рН

Параметры разбавителя - воды							рН биоотходов до смешивания	Параметры биомассы после смешивания с водой			
t, °C	%, мкСм/см	$\alpha$	$\zeta_0$	$\psi$ , град	рН <sub>0</sub> , ед.	T-T <sub>0</sub>		данные с ЭУК рН $\sigma$ , мкСм	коэфф-т А	коэфф-т В	рН, ед.
психрофильный режим сбраживания биоотходов											
20	0,0433417	0,2758	-0,065	15,6937	7,065	2	6,72	0,016129	-218,662	31,3224	6,981521
21	0,0451475	0,3043	-0,087	15,7771	7,087	1	6,71	0,016129	-109,481	15,6901	6,978753
22	0,0471269	0,3011	-0,052	15,8782	7,052	2	6,7	0,016129	-221,281	31,7044	6,980026
мезофильный режим сбраживания биоотходов											
35	0,0937097	0,5481	-0,025	19,0428	6,825	2	6,54	0,015689	-257,622	38,0606	6,769149
35	0,0981529	0,5665	-0,011	19,3506	6,811	1	6,53	0,015689	-130,845	19,3396	6,766444
37	0,1024521	0,5833	-0,002	19,646	6,802	2	6,52	0,015689	-265,903	39,29	6,7681
термофильный режим сбраживания биоотходов											
55	0,2062322	0,8345	-0,061	26,0889	6,561	2	6,26	0,024542	-336,884	52,1168	6,464488
56	0,2158349	0,8467	-0,046	26,617	6,546	1	6,25	0,024542	-171,649	26,571	6,460934
57	0,2260505	0,8585	-0,031	27,1702	6,531	2	6,24	0,024542	-351,068	54,3094	6,464675



Показания ЭУК рН соответствуют значению рН. Общий вид электротехнического устройства контроля рН биотехнологических отходов представлен на рисунке 8. Исследования ЭУК рН проводились в производственных условиях в действующей БГУ (рисунок 9).



Рисунок 8 – Общий вид электротехнического устройства контроля рН: 1 – блок индикации; 2 – автогенераторный измерительный преобразователь; 3 – первичный преобразователь



Рисунок 9 – Производственная БГУ: 1 – фекальный насос; 2 – БГУ-1,25 м<sup>3</sup>; 3 – газгольдер; 4 – ёмкость предварительной подготовки; 5 – ЭУК рН; 6 – компрессор; 7 – система загрузки/выгрузки эффлюента; 8 – термометр; 9 – циркуляционный насос

Оценка эффективности работы БГУ с применением ЭУК рН по сравнению с традиционным методом показана на рисунке 10.

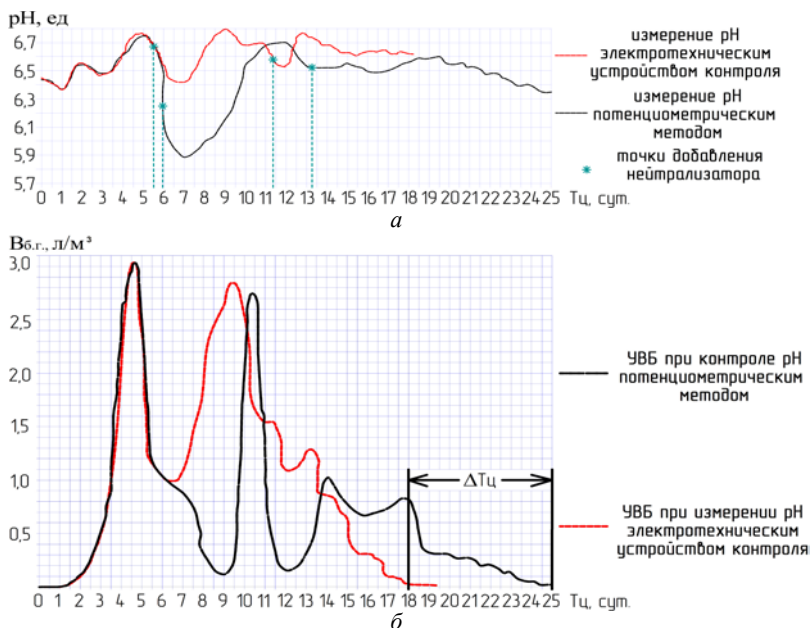


Рисунок 10 – Влияние способа диагностирования рН на динамику удельного выхода биогаза (В<sub>б.г.</sub>): а – изменение рН; б – влияние времени обнаружения отклонений рН от нормы и нейтрализации его уровня на В<sub>б.г.</sub>

Исследования по оценке эффективности работы БГУ с применением электротехнического устройства контроля рН на примере навоза КРС при мезофильном режиме сбраживания (рисунок 10) показали, что отклонение рН от оптимального значения, как в сторону щелочной среды, так и кислой равнозначно приводит к снижению удельного выхода биогаза на 6...12 %. Из рисунка 10 видно, что дистанционный непрерывный контроль концентрации ионов водорода с помощью ЭУК рН позволяет убрать дестабилизирующее воздействие на биопроцесс. Непрерывный контроль рН позволяет улучшить качество регулирования за счёт своевременного добавления в реактор нейтрализатора, когда значения, полученные с ЭУК рН, начинают отклоняться от оптимального. Таким образом, за счёт применения ЭУК рН БГУ вырабатывает такое же количество биогаза, что и традиционным методом измерения рН, но продолжительность цикла  $\Delta T_{\text{ц}}$  при этом сокращается с 25 до 18 сут., тем самым снижаются энергозатраты на поддержание температурного режима, перемешивание биомассы, работу насосов и т. п.

**В четвертой главе «Оценка технико-экономической эффективности применения разработанного электротехнического устройства контроля рН биоотходов»** дан расчет экономической эффективности и годового экономического эффекта. Полный экономический эффект определяли по приведённым затратам на предложенное решение (БГУ с ЭУК рН), которые сравнивали с затратами по аналогичному базисному варианту (БГУ с рН-метром). Результаты расчётов показали, что экономический эффект от применения ЭУК рН в БГУ достигается за счет снижения трудозатрат на диагностирование, что свидетельствует о том, что замена рН-метра на электротехническое устройство контроля рН экономически оправдана. Годовой экономический эффект по приведённым затратам для БГУ с объемом реактора 21 м<sup>3</sup> составляет около 48 тыс. руб. Срок окупаемости составляет 1,2 года (23 цикла), чистый дисконтированный доход в расчете на 5 лет срока службы ЭУК рН составил около 100 тыс. руб.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Анализ технологии анаэробной переработки биоотходов позволил выявить перспективное направление для повышения её эффективности за счёт усовершенствования средств контроля рН биоотходов. Обоснованы конструкторские решения и ре-

жимные параметры электротехнического устройства непрерывного контроля рН, которые подтверждены теоретическими и экспериментальными исследованиями.

2. На основе анализа известных способов контроля рН, разработанной их классификации и учёта особенностей технологии показано, что поставленная цель достигается за счёт применения диэлькометрического способа, который обеспечивает непрерывность и дистанционность, а также стабильность процесса сбраживания биоотходов.

3. Созданная модель измерительной ячейки (рисунок 2), графически отображает электрофизические процессы в биомассе при воздействии электрического поля, а её схемы замещения позволяют аналитически выразить связь рН с составляющими биоотходов (формула 12).

4. Разработан, изготовлен и откалиброван опытный образец электротехнического устройства контроля рН, работающего по автогенераторной схеме измерения на рабочих частотах 1–5 МГц. За счёт оригинального исполнения первичного преобразователя и конструкции охранных электродов относительная погрешность результатов тарировочных испытаний разработанного устройства в диапазоне рН = 5,6–9,7 ед. составила  $\pm 0,1$  ед., что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к биогазовой технологии.

5. Результаты лабораторных исследований смеси биоотходов показали, что сходимость теоретических данных проводимости биомассы с экспериментальными составляет около 95 %. Производственные испытания в биогазовой установке с объёмом реактора 1,25 м<sup>3</sup> показали, что предлагаемый способ измерения является работоспособным. Дистанционный непрерывный контроль позволяет убрать дестабилизирующее воздействие на биопроцесс и улучшить качество регулирования за счёт своевременного добавления в реактор раствора нейтрализатора, что сокращает продолжительность цикла с 25 до 18 сут., тем самым снижая энергозатраты.

6. Годовой экономический эффект от применения электротехнического устройства контроля рН в биогазовую установку с объёмом реактора 21 м<sup>3</sup> составляет около 48 тыс. руб. При внедрении ЭУК рН затраты электроэнергии сокращаются в 1,38 раза, а годовые приведенные затраты – в 1,48 раза. Срок окупаемости составляет 1,2 года, чистый дисконтированный доход за расчетный срок около 100 тыс. руб.

**Рекомендации.** Разработанное электротехническое устройство контроля рН может быть использовано не только для биогазовой технологии, но и в случае предварительной настройки и калибровки – для аналогичных грубодисперсных растворов, имеющих влажность более 75 %, таких, как сточные воды, ил и др. Для потребителей разработанного устройства составлены справочные данные для всех температурных режимов сбраживания наиболее распространенных на территории РФ видов биоотходов. В качестве разбавителя для доведения влажности биоотходов до нормируемых показателей рекомендуется использование воды с рН близкой к нейтральному значению. Для достижения необходимой точности интерпретации показаний ЭУК рН, необходимо периодически измерять с помощью кондуктометров значение исходной минерализации местной воды.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Создание маломощных автоматизированных биогазовых установок для личных подсобных и фермерских хозяйств, которые позволят сократить издержки мелким сельхозтоваропроизводителям за счёт создания установок для получения альтернативного топлива. Более глубокое исследование агрохимических свойств эффлюента позволит производить удобрения с необходимыми свойствами для каждой климатической зоны ведения сельского хозяйства показателями на местных биоотходах.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Работы, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:*

1. *Евстафьев, Д. П.* Теоретическое обоснование параметров первичного преобразователя при дизелькометрическом контроле рН биоотходов / Д. П. Евстафьев // Научное обозрение. – 2012. – Вып. 5. – С. 411–415 (0,28 печ. л.).

2. *Евстафьев, Д. П.* Электрофизическая модель контроля рН при подготовке биоотходов к анаэробному сбраживанию / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев, П. П. Гамаюнов // Научное обозрение. – 2012. - Вып. 5. – С. 416–420 (0,28 /0,093 печ. л.).

3. *Евстафьев, Д. П.* Обоснование параметров вторичного преобразователя электротехнического устройства контроля рН биоотходов / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Научное обозрение. – 2012. – Вып. 6. – С. 231–234 (0,22/0,11 печ. л.).

4. *Евстафьев, Д. П.* Исследование влияния рН биоотходов на удельный выход биогаза из БГУ / А. М. Эфендиев, Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – Вып. 1. – С. 56–59 (0,5/0,17 печ. л.).

*Статьи и тезисы докладов в других изданиях:*

5. *Евстафьев, Д. П.* Оптимизация подготовки и процесса анаэробного сбраживания биоотходов путем контроля рН субстрата / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Вавиловские чтения–2009 : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Ч. 3. – 25–26 ноября 2009 г. / ФГОУ ВПО «Сарат. ГАУ». — Саратов : Изд-во «КУБиК», 2009. – С. 215–217 (0,375 /0,1875 печ. л.).

6. *Евстафьев, Д. П.* Методы контроля и регулирования рН субстрата при подготовке и анаэробном сбраживании биоотходов / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Энергетика предприятий АПК и сельских территорий : состояние, проблемы и пути решения : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. / СПбГАУ. СПб., – 2010. – С. 184–187 (0,25 /0,125 печ. л.).

7. *Евстафьев, Д. П.* Использование информационных технологий при эксплуатации БГУ / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : Изд-во «КУБиК», 2010. – С. 378–381 (0,25 /0,125 печ. л.).

8. *Евстафьев, Д. П.* Система автоматического измерения и управления при подготовке и сбраживании биоотходов / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Шестой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций: в 2 ч. / ФГБОУ ВПО «Сарат. ГАУ». – Саратов, 2011. – Ч. 1. – С. 134–135. (0,25 /0,125 печ. л.).

9. *Евстафьев, Д. П.* Удельная электропроводность и диэлектрическая проницаемость биомассы при анаэробном сбраживании / Д. П. Евстафьев, Н. К. Шаруев // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы 2 Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 100–101 (0,25 /0,125 печ. л.).

10. *Евстафьев, Д. П.* Обоснование параметров диэлькометрического контроля рН биоотходов / Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев // Актуальные проблемы энергетики АПК : материалы 2 Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А. В. Павлова. – Саратов : Изд-во «КУБиК», 2011. – С. 311–313 (0,375 /0,1875 печ. л.).

11. *Евстафьев, Д. П.* Преимущества использования биоудобрений, полученных при анаэробном сбраживании отходов сельскохозяйственного производства / Д. П. Евстафьев, Н. К. Шаруев // Научное обеспечение АПК : материалы науч.-практ. конф. 2-й специал. выставки «САРАТОВ-АГРО.2011» / под ред. И. Л. Воротникова; ФГБОУ ВПО «Сарат. ГАУ». – Саратов, 2011. – С. 172–174 (0,375 /0,1875 печ. л.).

12. *Евстафьев, Д. П.* Совершенствование диэлькометрического контроля pH при подготовке биоотходов к анаэробному сбраживанию / Д. П. Евстафьев, Н. К. Шаруев // Научное обеспечение АПК : материалы науч.-практ. конф. 3-й специал. выставки «САРАТОВ-АГРО.2012» / под ред. И.Л. Воротникова; ФГБОУ ВПО «Сарат. ГАУ». – Саратов, 2012. – С. 112–114 (0,1875 /0,09375 печ. л.).

*В описаниях патентов:*

13. Промышленная установка для переработки органических отходов на биогаз и биогаз с системой управления на базе блока информационных технологий : Пат. на полезную модель 104286 Рос. Федерации : МКП F23G5/00 F23D7/00 C05F3/00 C02F3/00 / Шаруев Н. К., Эфендиев А. М., Шаруев В. Н., Евстафьев Д. П. (RU) ; заявитель и патентообладатель «Сарат. гос. аграрный ун-т им. Н. И. Вавилова». – № 2010122937/21 ; заявл. 04.06.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 13.

*Отчеты о научно-исследовательской работе:*

14. Разработка адаптированной к условиям регионов России биогазово-биогазусной технологии, выбор ее основных параметров и создание опытно-производственной установки для энергосберегающего энергообеспечения животноводческих ферм / отчет о НИР (закл.) / А. М. Эфендиев, В. А. Глухарев, С. С. Абрамов, Н. К. Шаруев, Д. П. Евстафьев [и др.] – Саратов : Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова, 2011. – 147 с. Регистрац. номер РК 01201280018.