На правах рукописи

Васильева Аяна Сергеевна

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗНЫХ СТОКОВ СВИНОВОДЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства
(по техническим наукам)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Благовещенск - 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского».

| | |
|---|---|
| Научный руководитель | кандидат технических наук, доцент<br>Евтеев Виктор Константинович |
| Официальные оппоненты: | Осмонов Орозмамат Мамасалиевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», кафедра теплотехники, гидравлики и энергообеспечения предприятий, доцент |
| | Друзьянова Варвара Петровна, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», кафедра эксплуатации автомобильного транспорта и автосервиса, заведующая кафедрой |
| Ведущая организация | ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» |

Защита состоится «24» марта 2017 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 220.027.01 на базе ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет», 675005, Амурская область, г. Благовещенск, ул. Политехническая, д. 86, корпус 12, ауд. 82, тел./факс 8 (4162) 49-10-44.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный аграрный университет» http://www.dalgau.ru/

Автореферат разослан «____» февраля 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Якименко Андрей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В условиях промышленного свиноводства нашли широкое применение бесподстилочное содержание животных и гидравлические системы удаления навоза из животноводческих помещений, которые обеспечивают достаточную чистоту, препятствуют разносу инфекции и при правильном устройстве и эксплуатации улучшают микроклимат помещений. При использовании данной системы удаления навоза, а также за счет сброса воды, используемой для технологических целей, получают жидкий навоз и навозные стоки влажностью до 98%, поэтому возникают трудности при переработке больших масс свиного навоза и стоков, что и определяет актуальность данной работы.

Одним из перспективных направлений решения проблемы является применение технологии анаэробной переработки навозных стоков в биоэнергетической установке. Применение данной технологии для переработки свиного навоза и навозных стоков позволит получить качественное органическое удобрение, альтернативный вид топлива в виде биогаза, решить вопросы ресурсосбережения и охраны окружающей среды.

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР Иркутского ГАУ «Разработка энергосберегающих технологий и средств механизации сельскохозяйственных процессов» (тема 24К, регистрационный номер: 01.2.00900777). Работа входила в комплекс НИР Иркутского ГАУ, выполненных в 2015 году по заказу Министерства сельского хозяйства РФ по теме: «Актуализация ветеринарно-санитарных правил по использованию животноводческих стоков для орошения и удобрения сельскохозяйственных угодий в части современных требований к качеству навозосодержащих стоков».

**Целью работы** является обоснование и разработка технологии переработки навозных стоков свиноводческих предприятий с применением анаэробного фильтра для получения органических удобрений и биогаза.

На основе поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследований:**

1. Разработать анаэробный фильтр с гидродинамическим возмущением за счет изменения скорости движения свободной поверхности жидкости. Получить гидравлическую модель для определения зависимости величины гидродинамических возмущений от параметров работы анаэробного фильтра.
2. Исследовать влияние величины гидродинамического возмущения в анаэробном фильтре на степень очистки навозных стоков и выход биогаза. Получить модели основных технологических оценочных параметров анаэробного фильтра.
3. Разработать технологию переработки навозных стоков свиноводческих предприятий с применением анаэробного фильтра с гидродинамическим возмущением.
4. Обосновать экономическую эффективность переработки животноводческих стоков с применением анаэробного фильтра.

**Объектом исследования** является технологический процесс анаэробного сбраживания жидкого свиного навоза в анаэробном фильтре с сифонным отводом.

**Предмет исследования** – закономерности гидродинамического возмущения в анаэробном фильтре за счет изменения скорости движения субстрата.

**Научная новизна работы:**

- анаэробный фильтр с сифонным отводом, для переработки жидкой фракции свиного навоза с гидродинамическим возмущением за счет изменения скорости движения свободной поверхности жидкости;

- функциональная зависимость скорости движения свободной поверхности стоков в фильтре;

- технологическая линия для переработки навозных стоков с получением органического удобрения, биогаза.

**Теоретическая значимость.** Разработана гидравлическая модель анаэробного фильтра с циклическим возмущением за счет изменения скорости движения свободной поверхности жидкости.

**Практическая ценность**. Разработана технология переработки жидкого свиного навоза с применением анаэробного фильтра с сифонным отводом.

**Метод исследования:** эксперимент.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

- результаты теоретических исследований процесса анаэробного сбраживания в анаэробном фильтре с сифонным отводом животноводческих стоков свиноводческих предприятий;

- результаты экспериментальных исследований процесса анаэробного сбраживания животноводческих стоков свиноводческих предприятий и регрессионные уравнения основных технологических оценочных параметров.

**Апробация**. Основные положения диссертационной работы были доложены на: международной научно–практической конференции ИрГСХА «Природопользование и аграрное производство» (Иркутск, 2012); научно-практическом семинаре, посвященном дню аспиранта ИрГСХА (Иркутск, 2013); международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию аспирантуры ИрГСХА (Иркутск, 2013); международной научно-практической конференции молодых учёных ИрГСХА (Иркутск, 2013); региональной научно-практической конференции с международным участием, посвященной 80-летию ИрГСХА «Современные проблемы и перспективы развития АПК» (Иркутск, 2014); международной научно-практической конференции «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии» ИрГСХА (Иркутск, 2013, 2014, 2015); VI-ой региональной научно-практической конференции «Чтения И.П. Терских» (Иркутск, 2014); региональной научно-практической конференции, посвященной Дню российской науки и Дню аспиранта Иркутского ГАУ (Иркутск, 2015); региональной студенческой научно-практической конференции с международным участием, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне и 100-летию со Дня рождения А.А. Ежевского (Иркутск, 2015); ежегодной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов БГСХА, посвященной Дню российской науки (г. Улан-Удэ, 2015); ежегодной научной конференции преподавателей, научных работников и аспирантов ВСГУТУ (г. Улан-Удэ, 2015, 2016); международной научно-практической конференции Иркутского ГАУ, посвященной 80-летию со дня рождения профессора Хуснидинова Ш.К. (Иркутск, 2016).

**Публикация.** По теме диссертации опубликованы 15 печатных работ, в том числе из списка ВАК 3 общим объемом 3,7 печатных листа.

**Внедрение.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований и моделирующая демонстрационная установка, имитирующая процесс работы анаэробного фильтра, используются в учебном процессе на кафедре «Техническое обеспечение АПК» при проведении лекционных и лабораторно-практических занятий со студентами инженерного факультета. Лабораторная производственная установка смонтирована на свиноводческом комплексе СХПК «Усольский свинокомплекс» Иркутской области.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографического списка и приложений. Она изложена на 153 страницах, включает 15 таблиц, 29 рисунков, 4 приложения. Библиографический список включает 136 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана ее краткая характеристика, определены цель и задачи исследований, описана научная новизна и практическая ценность данной работы.

**В первой главе** проведен обзор способов содержания животных, систем удаления навоза, описаны характеристики свиного навоза: состав и свойства. На основе обзора литературных источников составлена классификация метантенков с фиксированной биомассой, выявлены возможные способы их интенсификации, предложена оригинальная конструкция анаэробного фильтра.

К основным технологиям переработки и подготовки свиного навоза к использованию относят: переработку жидкой и твердой фракции, компостирование, вермикомпостирование и анаэробная переработка навозных стоков. Технология анаэробной переработки навозных стоков позволит получить качественное органическое удобрение и альтернативный источник энергии в виде биогаза, в результате чего можно покрыть затраты энергии на переработку отходов свиноводческого комплекса.

Научные основы анаэробного сбраживания отражены в работах: Баадер В., Гриднева П.И., Данилович Д.А., Друзьяновой В.П., Дубровского В.Г., Евтеева В.К., Калюжного С.В., Ковалева А.А., Монгайта Л.И., Панцхавы Е.С., Унгуряну Д.В., Эдера Б. и других ученых.

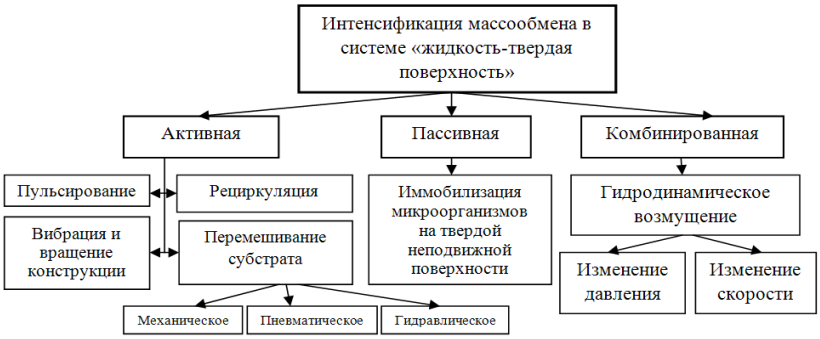


Рисунок 1 - **Интенсификация массообмена в системе «жидкость - твердая поверхность»**

Анаэробное сбраживание является сложным многостадийным процессом, протекающим при участии различных видов микроорганизмов и происходящим в определенной последовательности. Интенсификация процесса сбраживания позволит улучшить условия для жизнедеятельности микроорганизмов, что повысит эффективность работы биоэнергетической установки. Существуют различные методы интенсификации массообмена в вышеуказанной системе, но все методы можно подразделить на активные, пассивные и комбинированные (рис. 1). В свою очередь методы подразделяются на способы.

В данной работе выбран комбинированный метод интенсификации процесса сбраживания субстрата в анаэробном фильтре, основанный на создании гидродинамического возмущения за счет изменения скорости движения сбраживаемой жидкости в фильтре. Обзор существующих методов и способов показал, что данный вопрос в имеющейся литературе не достаточно изучен. В связи с чем, нами разработана оригинальная конструкция анаэробного фильтра с сифонным отводом (рис. 2).

Анаэробный фильтр (АФ) представляет собой вертикальный теплоизолированный фильтр 1 с подводом навозных стоков с верхней части. Внутри фильтра расположен иммобилизатор 5, на которой прикрепляются микроорганизмы. Отвод обработанных сточных вод осуществляется в нижней части фильтра через патрубок 3. Отвод биогаза происходит через гидравлический затвор 7, что обеспечивает относительно постоянное давление в фильтре. Гидравлический затвор представляет собой емкость, заполненную водой, в которую погружен патрубок 6, выходящий из газового объема фильтра. Величина давления, при котором происходит срабатывание затвора зависит от высоты погружения патрубка 6, изменяя которую можно поддерживать заданные пределы колебания давления в газовом объеме. Сифонный отвод для отработанных стоков состоит из бака 9 и трубопровода 10.

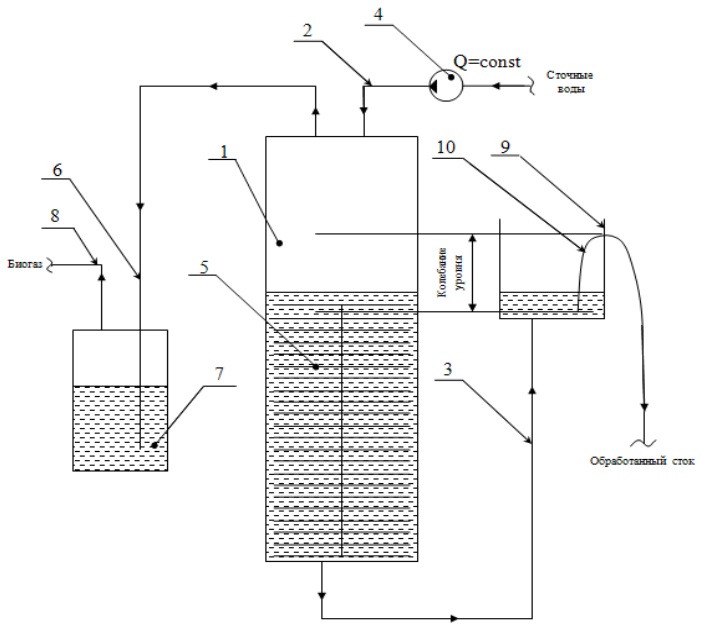


Рисунок 2 - **Анаэробный фильтр с сифонным отводом**

**Во второй главе** описаны движение жидкости и газа в процессе анаэробного разложения, цикл работы анаэробного фильтра, разработана гидравлическая модель АФ.

Процесс биологической очистки навозных стоков с иммобилизированной микрофлорой является сложным многостадийным процессом, протекающим в гетерогенной двухфазной системе (жидкость – газ). Данные многофазные процессы сопровождаются явлениями массопередачи – перенос субстрата, из жидкости на поверхность биопленки, а также внутрь биопленки до твердой поверхности. В основе этих транспортных процессов лежит диффузионный перенос, который осложнен биохимическими реакциями, протекающими на твердой поверхности пленки, населенной микроорганизмами. Следовательно, на массоперенос влияет концентрация вещества, которая зависит от метаболизма иммобилизированной микрофлоры.

Цикл работы анаэробного фильтра с сифонным отводом состоит из двух фаз – заполнения и опорожнения. Фаза заполнения начинается с нижнего уровня стоков в баке сифона (рис. 3, а). В результате постоянного выделения биогаза и подачи стоков на обработку, давление в газовом объеме возрастает. При достижении давления величины, соответствующей глубине погружения патрубка в гидравлическом затворе, начинается отвод биогаза (рис. 3, б). В тоже время сточные воды, прошедшие процесс брожения, постоянно заполняют бак сифона, до тех пор, пока не достигнут верхнего уровня расположения сифонного трубопровода.

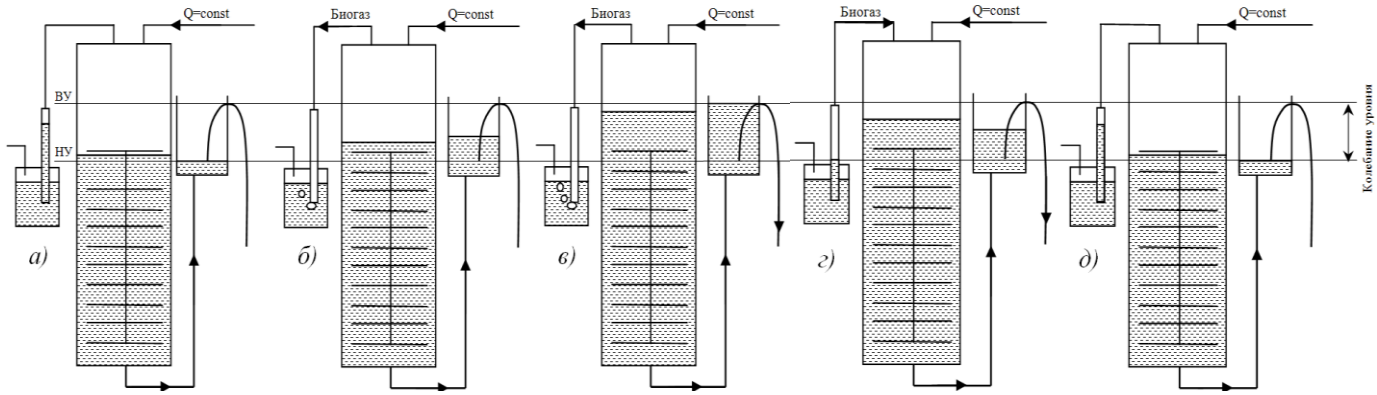


Рисунок 3 – **Цикл работы анаэробного фильтра**

Фаза опорожнения начинается, как только обработанный сток заполнит сифонный трубопровод (рис. 3, в). Происходит быстрое опорожнение бака через сифонный трубопровод, при этом из фильтра в бак начинает поступать стоки.

В результате снижения уровня стоков в фильтре наблюдается понижение давления в газовом объеме (рис. 3, г). Так, опорожнение бака сифона вызывает изменение скорости движения сточных вод в фильтре, но с окончанием фазы опорожнения её величина обратно снизиться до величины обеспечиваемой подачей насоса в фильтр (рис. 3, д – а). Далее цикл работы анаэробного фильтра с сифонным отводом повторяется.

Разработана гидравлическая модель работы анаэробного фильтра в фазе опорожнения. Определены следующие ограничения и предположения: подача субстрата в реактор, следовательно расход субстрата ($Q_ж$) – величина постоянная; конструктивные размеры реактора постоянные; выход биогаза ($Q_б$) – величина переменная, но при составлении модели используется его среднее значение, принимаемое постоянным; состояние системы изотермическое (T = const).

Для оценки возмущений в данной фазе принимается параметр – скорость движения свободной поверхности стоков в фильтре ($v_ф$), которая будет определять скорость движения сбраживаемой жидкости в фильтре. Данную скорость можно определить, составив уравнение баланса объемного расхода. Для этого рассмотрим фазу опорожнения (рис. 4). Движение жидкости в сифонной трубке является неустановившимся, так как напор $Z_1$ изменяется с течением времени, следовательно, меняется со временем скорость и расход вытекающей жидкости. Допустим, что уровень жидкости в фильтре и баке в данный момент времени находятся соответственно на высоте $Z_1$ и $Z_2$. За бесконечно малый промежуток времени опорожнения $dt_{оп}$ уровень в фильтре изменяется на $dZ_1$, а в сифоне на $dZ_2$, движение жидкости можно считать установившимся. За это время из сифона вытечет объем жидкости $Q_c dt_{оп}$, в тоже время в бак из фильтра перетечёт объем жидкости $Q_{пр} dt_{оп}$. В свою очередь в фильтр постоянно поступает объем жидкости $Q_{под} dt_{оп}$, в тоже время из фильтра вытекает объем жидкости $Q_{выт} dt_{оп}$. Тогда объем жидкости в баке сифонного отвода изменится на величину $dW_б$, а изменение объема жидкости в фильтре составит $dW_ф$.

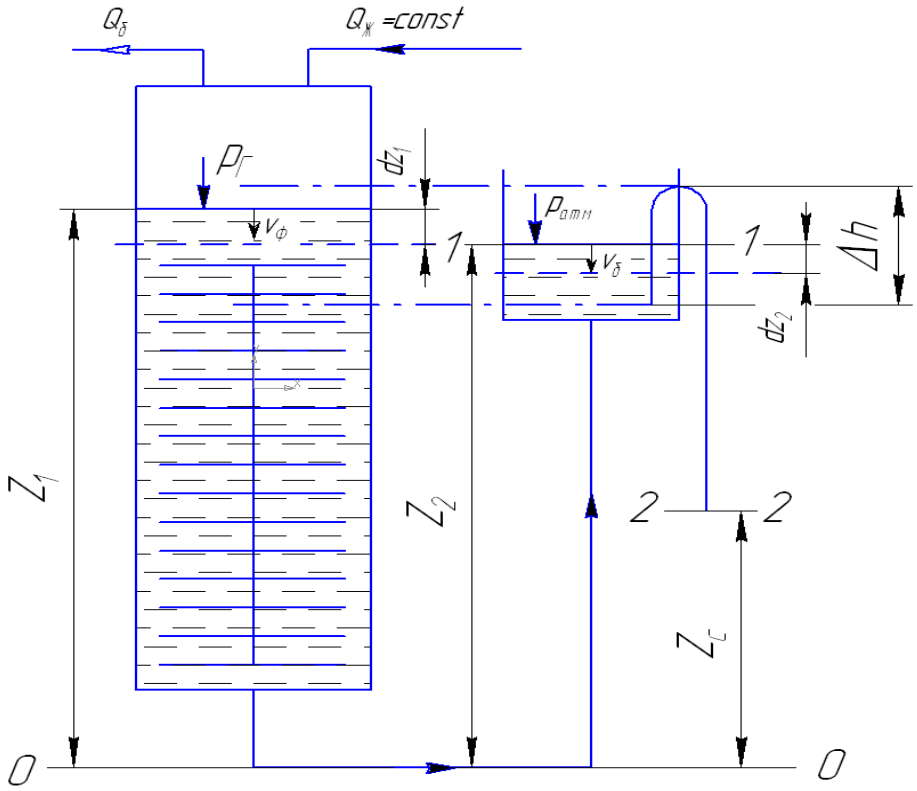


Рисунок 4 – **Расчетная схема анаэробного фильтра**

Баланс объемов данной системы представится в виде двух уравнений:

$$dW_б = Q_с dt_{оп} - Q_{пр} dt_{оп};$$
$$dW_ф = Q_{выт} dt_{оп} - Q_{под} dt_{оп}. \quad (1)$$

В приведенной системе уравнений очевидным является, то что объем притекающий из фильтра в бак $Q_{пр} dt_{оп}$ и объем вытекающий из фильтра в бак $Q_{выт} dt_{оп}$ равны. Таким образом, можно приравнять уравнения:

$$Q_с dt_{оп} - dW_б = dW_ф + Q_{под} dt_{оп}. \quad (2)$$

Изменение объема бака:

$$dW_б = \omega_б dz_2, \quad (3)$$

где $\omega_б$ - площадь живого сечения бака сифона, м$^2$.

Изменение объема фильтра:

$$dW_ф = \omega_ф dz_1, \quad (4)$$

где $\omega_ф$ - площадь живого сечения фильтра, м$^2$.

Подставив уравнения (3) и (4) в уравнение (2), и решая его относительно изменения высоты $dZ_1$ получим:

$$dz_1 = \frac{Q_с dt_{оп} - Q_{под} dt_{оп} - \omega_б dz_2}{\omega_ф}. \quad (5)$$

Скорость движения свободной поверхности в фильтре $dv_ф$ определим поделив уравнение (5) на время опорожнения $dt_{оп}$

$$dv_ф = \frac{dz_1}{dt_{оп}} = \frac{dQ_с - Q_{под} - \omega_б dv_б}{\omega_ф}, \quad (6)$$

где $dv_б = \frac{dz_2}{dt_{оп}}$ – скорость движения свободной поверхности стоков в баке сифона, м/с.

Если рассматривать весь период опорожнения, то движение жидкости является неустановившимся, поэтому нами в уравнение (6) указано на изменение расхода сифонного отвода:

$$dQ_с = \omega_c dv_c, \quad (7)$$

где $\omega_c$ – площадь живого сечения сифонного трубопровода, $м^2$; $dv_c$ – скорость движения в сифонном трубопроводе, м/с.

Уравнение (6) в функциональном виде запишется как:

$$dv_ф = f(dQ_с; Q_{под}; \omega_б; dv_б; \omega_ф) = f(dQ_с; Дз; d_б; \Delta h;\ d_ф; l_ф), \quad (8)$$

где Дз – доза загрузки, %; $d_б$ – диаметр бака сифона, м; $\Delta h$ – высота колебания жидкости в баке сифона, м; $d_ф$ – диаметр фильтра, м; $l_ф$ – длина рабочей части фильтра, м.

Для определения расхода сифона используем уравнение Бернулли, с учетом инерционного напора. Так, сечение 1-1 совпадает со свободной поверхностью жидкости в баке сифона, а сечение 2-2 – совпадает с концом сифонного трубопровода (рисунок 4), с учетом этого уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{v_б^2}{2g} + z_2 = \frac{v_с^2}{2g} + z_с + \lambda \frac{l_с}{d_с} \frac{{v_с}^2}{2g} + \sum \xi_с \frac{{v_с}^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_{s_2}^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds. \quad (9)$$

Воспользовавшись уравнением неразрывности, определим расход сифона:

$$Q_с = \sqrt{\frac{1}{1 + \lambda \frac{l_с}{d_с} + \sum \xi_с}} * \omega_с * \left[ v_б + \sqrt{2gH} - \sqrt{2 l_c \frac{dv_c}{dt}} \right], \quad (10)$$

где $H = z_2 - z_с$ – напор сифона, м; $\sqrt{2 l_c \frac{dv_c}{dt}} = \sqrt{2 \int_{s_2}^{s_1} \frac{\partial v}{\partial t} ds}$ – инерционная скорость, где неучтены изменения при движении жидкости в баке сифона (ввиду их незначительности) и принято, что сечение сифонного трубопровода постоянно по длине и является цилиндрическим.

В функциональном виде формула (10) определяется как

$$Q_{\text{с}} = f\left[\lambda; l_{\text{с}}; d_{\text{с}}; \sum \xi_{\text{с}}; v_{\text{б}}; H; \frac{dv_c}{dt}\right] = f\left[T; W; K; l_{\text{с}}; d_{\text{с}}; \sum \xi_{\text{с}}; d_{\text{б}}; H; \frac{dv_c}{dt}\right], \quad (11)$$

где Т – температура стоков, °С; W – влажность стоков, %; К – химический состав стоков.

Из анализа уравнений (8) и (10) определим функциональную зависимость скорости движения свободной поверхности стоков в фильтре:

$$v_{\text{ф}} = f\left[\text{Дз}; l_{\text{ф}}; \Delta h;\ d_{\text{б}}; d_{\text{ф}}; T; W; K; l_{\text{с}}; d_{\text{с}}; \sum \xi_{\text{с}}; H; \frac{dv_c}{dt}\right]. \quad (12)$$

Полученная функциональная зависимость показывает, что скорость движения жидкости в фильтре зависит от большого числа факторов, таких как, физико-химические характеристики субстрата ($W; K$) и технологические параметры анаэробного сбраживания (*Дз; Т*;), а так же конструктивные особенности установки ($l_{\text{ф}}; \Delta h;\ d_{\text{б}}; d_{\text{ф}}; l_{\text{с}}; d_{\text{с}}; \sum \xi_{\text{с}}; H$). Наиболее технологичными факторами для управления скоростью являются: $\text{Дз}; \Delta h;\ d_{\text{б}}; d_{\text{ф}}; d_{\text{с}}; H$. Причем увеличение $d_{\text{с}}, H$ будут способствовать повышению скорости, а увеличение $\text{Дз}, \Delta h;\ d_{\text{б}}, d_{\text{ф}}$ будут снижать её.

**В третьей главе** представлена методика проведения экспериментальных исследований. Главной целью экспериментальных исследований является подтверждение ранее проведенных теоретических исследований величины гидродинамического возмущения в анаэробном фильтре и его влияния на выход биогаза при сбраживании навозных стоков.

Экспериментальные исследования проводились по следующим основным этапам: 1 - проведение исследований на демонстрационной установке; 2 - проведение исследований на лабораторной производственной установке по метановому сбраживанию.

На первом этапе проводилось моделирование гидродинамического возмущения на демонстрационной установке и определено влияние основных конструктивных и технологических факторов анаэробного фильтра на его величину и интенсивность.

К основным оценочным параметрам, характеризующим величину и характер циклических гидродинамических возмущений относятся: $\Delta p$ (Па) – изменение давления в газовом объеме анаэробного фильтра, характеризует величину возмущающего воздействия и позволяет оценить интенсивность высвобождения пузырьков биогаза; $V$ (м/с) - скорость движения свободной поверхности жидкости в фильтре, характеризует величину создаваемого гидродинамического возмущения, позволяет оценить интенсивность конвективного массопереноса за счет движения сбраживаемой жидкости; $t_{цикла}$ (с) - продолжительность цикла работы анаэробного фильтра, характеризует временной отрезок повторности фаз; $n$ (циклов/сутки) – частота протекания циклов, показывает периодичность возмущений.

В результате проведения теоретических исследований и изучения априорной информации принято решение варьирования следующими факторами: $X_{1M}$ ($h_з$ ) - высота погружения трубки в гидравлическом затворе, поддерживает заданное колебание давления в газовом объеме фильтра, тем самым обеспечивает отвод биогаза; $X_{2M}$ ($\Delta h$) – уровень колебания жидкости в баке сифона; $X_{3M}$ ($\omega_{\text{ф}}/\omega_{\text{б.с}}$) –

отношение площади сечения фильтра к площади сечения бака сифона; $X_{4M}$ ($Q_ж$) - подача жидкости в анаэробный фильтр; $X_{5M}$ ($H$) – напор сифона, $10^{-3}$м.

С целью выявления значимых факторов, определяющих величину возмущающих воздействий и установления взаимосвязей между ними, исследования проводились на двух уровнях – максимальном (+1) и минимальном (-1). При использовании полного факторного эксперимента $2^5$, необходимо проведение 32 опытов. При пятикратной повторности опытов, их общее количество возрастает до 160. Принято решение о минимизации количества опытов, используя дробный факторный эксперимент $2^{5-2}$ (план ввиду ограниченного объема автореферата не приведен). Схема демонстрационной установки представлена на рисунке 5, моделирующая жидкость – вода, газ – атмосферный воздух.

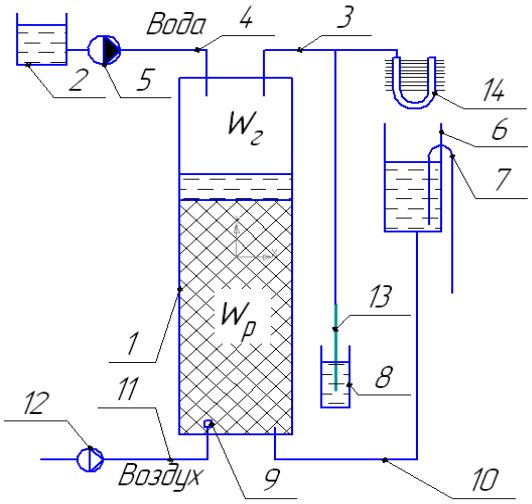


Рисунок 5 – **Схема моделирующей демонстрационной установки**: 1 – стеклянная труба; 2 – емкость для жидкости; 3 – подводящий воздушный патрубок; 4 – подводящий жидкостный патрубок; 5, 12 – шланговые насосы; 6 – бак сифона; 7 – сифонный трубопровод; 8 – гидравлический затвор; 9 – фильтр дырчатый; 10 – отводящий жидкостный патрубок; 11 – подводящий газовый патрубок; 13 – стеклянная трубка гидравлического затвора; 14 – жидкостный манометр; $W_р$ - рабочий объем; $W_г$ – газовый объем.

На лабораторной производственной установке проводилось анаэробное сбраживание навозных стоков с различной величиной гидродинамического возмущения. Оценочными параметрами приняты: $Q_1$ – выход биогаза, м$^3$ в сутки, характеризует скорость процесса; $Q_2$ – выход биогаза с рабочего объема фильтра, м$^3$/м$^3$ РОФ – удельный показатель, характеризует производительность фильтра; $Q_3$ – выход биогаза с единицы загруженного абсолютно сухого органического вещества, м$^3$/ кг АСОВ – удельный показатель, характеризует степень перехода органического вещества в биогаз; С – степень содержания в биогазе метана, %, показывает на топливную ценность биогаза; $Q_5$ – энерговыделение, МДж/ м$^3$ РОФ, показывает выход энергии с рабочего объема фильтра, характеризует скорость процесса; $Q_6$ – энергоотдача, МДж/ кг АСОВ показывает выход энергии с единицы загруженного абсолютно сухого вещества, характеризует качественную сторону процесса; Ср – степень разложения органического вещества, %, характеризует качество очистки стоков; Пк – степень изменения потребления кислорода до и после сбраживания (по ХПК), характеризует экологический эффект метанового сбраживания.

В результате проведенных теоретических исследований и демонстрационного эксперимента приняты три фактора, оказывающее наибольшее влияние на работу анаэробных фильтров: ДЗ ($X_1$) – доза загрузки, %; $d_ф/d_{б.с.}$($X_2$)– отношение диаметров анаэробного фильтра и бака сифона; $h_{кол}$ ($X_3$) - высота колебания уровня жидкости в баке сифона, мм (см. табл. 1). Сбраживание навозных стоков про-

водилось в непрерывном режиме при психрофильном температуре сбраживания (Тс = 25 °С) с проведением 6 одновременных опытов по 2 блока (табл. 1).

Лабораторная производственная установка (см. рис. 6) состояла из 6 анаэробных фильтров, работающих автономно, с общим подводом субстрата.

Таблица 1 – **План-матрица производственного эксперимента**

| Номер эксперимента | Блок | Порядок случайной реализации | $X_1$= ДЗ | | $X_2$= $d_ф/d_{б.с.}$ | | $X_3$= $h_{кол}$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | код | натур | код | натур | код | натур |
| 1 | 1 | 5 | +1 | 200 | +1 | 1:1 | +1 | 400 |
| 2 | | 3 | 0 | 125 | +1 | 1:1 | +1 | 400 |
| 3 | | 6 | -1 | 50 | +1 | 1:1 | +1 | 400 |
| 4 | | 1 | +1 | 200 | -1 | 1,3:1 | +1 | 400 |
| 5 | | 4 | 0 | 125 | -1 | 1,3:1 | +1 | 400 |
| 6 | | 2 | -1 | 50 | -1 | 1,3:1 | +1 | 400 |
| 7 | 2 | 7 | +1 | 200 | +1 | 1:1 | -1 | 200 |
| 8 | | 11 | 0 | 125 | +1 | 1:1 | -1 | 200 |
| 9 | | 8 | -1 | 50 | +1 | 1:1 | -1 | 200 |
| 10 | | 10 | +1 | 200 | -1 | 1,3:1 | -1 | 200 |
| 11 | | 12 | 0 | 125 | -1 | 1,3:1 | -1 | 200 |
| 12 | | 9 | -1 | 50 | -1 | 1,3:1 | -1 | 200 |

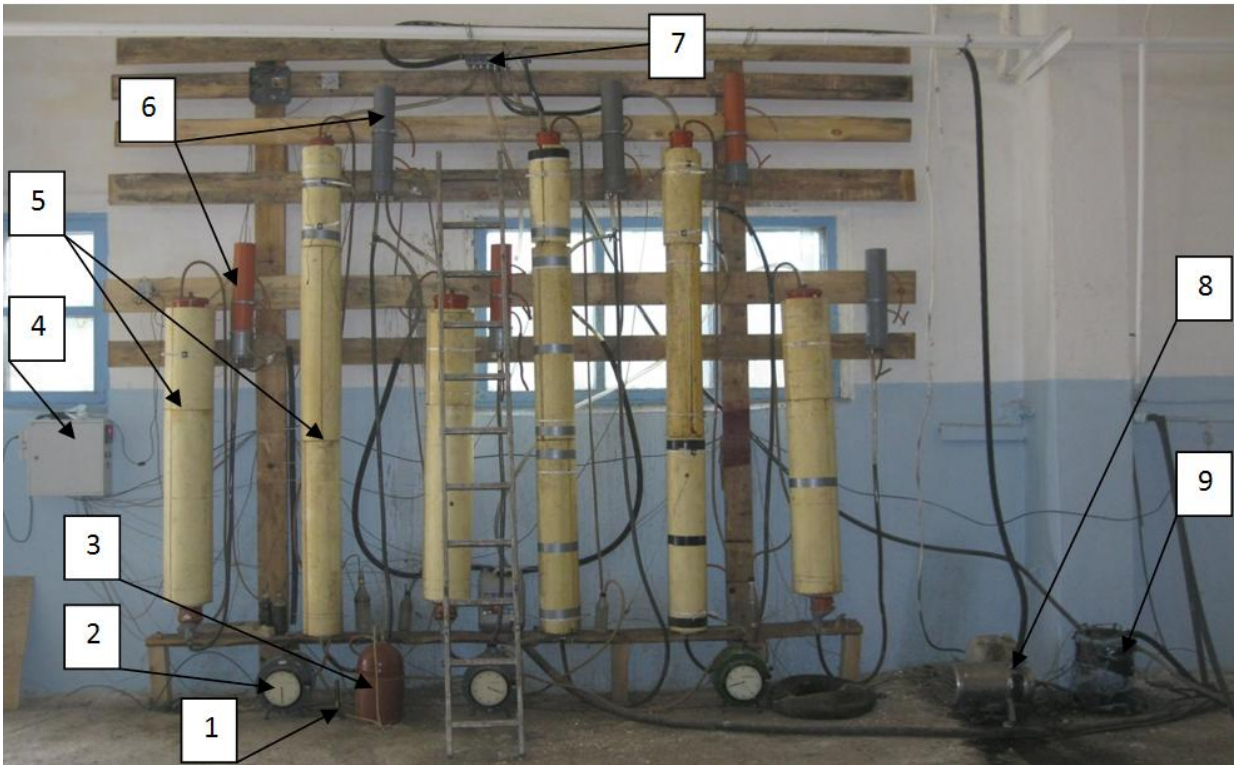


Рисунок 6 – **Фотография лабораторной производственной установки**: 1 – газовая горелка; 2 – газовый счетчик ГСБ-400; 3 – газгольдер; распределительная гребенка; 4 – щит управления; 5 – анаэробный фильтр; 6 - бак сифона; 7 – распределительная гребенка; 8 – центробежный насос Г2-ОПА; 9 – приемный бак.

Лабораторные реакторы были изготовлены их ПВХ труб с внутренним диаметром 100 и 130 мм, соответственно длиной 2,5 и 1,5 метра. Рабочий объем реакторов во всех анаэробных фильтрах составлял по 18 литров. Внутри рабочего объема реактора располагался иммобилизатор для прикрепления микроорганиз-

мов. Он представляет собой кассету, состоящую из грубого сетчатого материала свернутого в трубу. В получившейся трубе прикрепляются сетки (толщина нити сетки 0,2 мм, ячья 6х6 мм), поперек продольной оси, в результате получается сетчатый фильтр. Материал носителя – полипропилен.

Для запуска анаэробных фильтров применялась закваска с сообществом психрофильных анаэробных микроорганизмов. Закваска готовилась на нативном навозе КРС, как наиболее обогащенного анаэробными микроорганизмами.

**В четвертой главе** проведен анализ результатов экспериментальных исследований. В результате математической обработки результатов экспериментальных исследований на демонстрационной установке получены следующие регрессионные уравнения:

- изменение давления в газовом объеме фильтр, Па:

$$\Delta p = 105{,}8 + 79{,}33\Delta h, \quad (13)$$

- скорость движения свободной поверхности жидкости в фильтре, м/с:

$$V = 0{,}0182 + 0{,}00195\, h_з + 0{,}0806\omega_ф/\omega_{б.с}, \quad (14)$$

- продолжительность цикла возмущения в анаэробном фильтре, с:

$$t_{цикла} = 2761{,}85 - 1737{,}87\omega_ф/\omega_{б.с}, \quad (15)$$

- частота протекания циклов, циклов/сутки:

$$n = -38{,}18 + 268{,}886\omega_ф/\omega_{б.с}. \quad (16)$$

Анализ полученных уравнений показал, что наиболее значимыми факторами являются $\omega_ф/\omega_{б.с}$ ($X_{3М}$) – отношение площади фильтра к площади бака сифона, и $\Delta h$ ($X_{2М}$) – высота колебания жидкости в баке сифона. Причем уменьшение отношения площади фильтра к площади бака сифона увеличивает интенсивность гидродинамического возмущения за счет увеличения скорости движения свободной поверхности и повышает частоту циклов, из-за снижения продолжительности цикла. Высота колебания жидкости в баке сифона влияет на величину колебания давления в газовом объеме фильтра. Увеличение высоты повышает уровень колебания жидкости в фильтре, но снижает частоту циклов за счет повышения времени цикла.

Выполнен график изменения скорости свободной поверхности в фильтре по времени цикла (см. рис. 7), который и характеризует гидродинамическое воз-

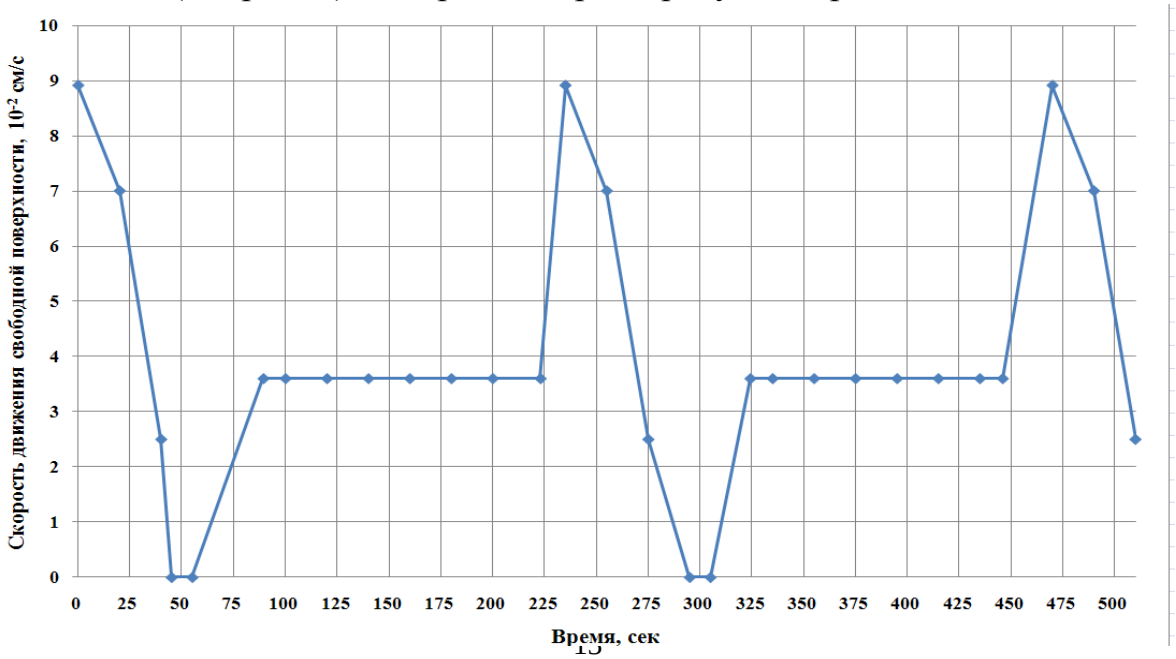

Рисунок 7 – **График изменения скорости свободной поверхности жидкости в фильтре по времени цикла**.

мущение. Анализ графика показывает, что в фильтре создается возбуждение, которое имеет циклический характер. Величина скорости движения свободной поверхности имеет широкую амплитуду и в фазе опорожнения, а также в начале фазы заполнения присутствует ускорение. Период возбуждения, когда скорость изменяется, составляет 100 сек. (42,5 %), а период стабилизации – 134,9 сек. (57,5%), при продолжительности цикла в 234,9 сек.

Результаты экспериментальных исследований анаэробного сбраживания навозных стоков в анаэробном фильтре с сифонным отводом представлены в таблице 2. Выход биогаза колеблется в достаточно широких пределах от 52 (6 опыт) до 230 литров (7 опыт), что объясняется разницей в дозе загрузки. Степень разложения органического вещества колебалась от 62,55 до 77,86 %, при средней около 70,47 %. Степень разложения находиться в прямой зависимости от периода оборота анаэробного фильтра, т.е. времени пребывания субстрата в реакторе, которая изменялась от 2 суток при ДЗ = 50 % до 0,5 суток при ДЗ = 200 %. Таким образом, увеличение периода оборота увеличивает степень разложения органического вещества.

Таблица 2 – **Результаты экспериментальных исследований анаэробной переработки животноводческих стоков**

| Показатели | Опыты | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| $X_1$, % | 200 | 125 | 50 | 200 | 125 | 50 | 200 | 125 | 50 | 200 | 125 | 50 |
| $X_2$ | 1 | 1 | 1 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1 | 1 | 1 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| $X_3$, м | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Влажность стоков, % | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 | 99 |
| Зольность стоков, % | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 | 8,3 |
| Количество абсолютно сухого органического вещества, кг | 0,3301 | 0,2063 | 0,0825 | 0,3301 | 0,2063 | 0,0825 | 0,3301 | 0,2063 | 0,0825 | 0,3301 | 0,2063 | 0,0825 |
| Выход биогаза, $м^3$/сут | 0,20590 | 0,13525 | 0,05900 | 0,19140 | 0,12216 | 0,05218 | 0,23070 | 0,15846 | 0,06962 | 0,21217 | 0,13597 | 0,06015 |
| Влажность обработанных стоков, % | 99,59 | 99,64 | 99,66 | 99,57 | 99,62 | 99,64 | 99,65 | 99,70 | 99,71 | 99,61 | 99,65 | 99,67 |
| Зольность обработанных стоков, % | 20,73 | 23,42 | 24,89 | 19,67 | 22,54 | 23,47 | 24,03 | 28,06 | 29,43 | 21,68 | 24,56 | 25,89 |
| Количество абсолютно сухого органического вещества в обработанных стоков, кг | 0,1162 | 0,0616 | 0,0228 | 0,1236 | 0,065 | 0,0246 | 0,0951 | 0,0482 | 0,0182 | 0,1092 | 0,0590 | 0,0218 |
| Степень разложения, % | 64,77 | 70,14 | 72,34 | 62,55 | 68,11 | 70,16 | 71,20 | 76,63 | 77,86 | 66,90 | 71,40 | 73,54 |

На основании проведенных опытов по метановому сбраживанию в анаэробном фильтре получены регрессионные модели основных технологических оценочных параметров, с использованием ППП STATISTICA 6.0 (уравнения 17 – 24). Адекватность полученных уравнений проверялась с использованием критерия Фишера. По результатам проверки уравнения признаны адекватными. Значимость

коэффициента оценивалась по t-критерию Стьюдента. Уровень значимости всех критериев – 0,05.

Выход биогаза, $м^3$/сут.:

$$\boldsymbol{Q_1}=0{,}074+0{,}00113\boldsymbol{ДЗ} - 0{,}047\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 0{,}028\boldsymbol{h_{кол}} - 0{,}00045\,\boldsymbol{ДЗ\cdot h_{кол}}. \quad (17)$$

Выход биогаза с рабочего объема фильтра, $м^3/м^3$ РОФ в сут.:

$$\boldsymbol{Q_2}=4{,}106 + 0{,}063\boldsymbol{ДЗ} - 2{,}62\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 1{,}56\boldsymbol{h_{кол}} - 0{,}025\,\boldsymbol{ДЗ\cdot h_{кол}}. \quad (18)$$

Выход биогаза с единицы загруженного абсолютно сухого органического вещества, $м^3$/кг АСОВ:

$$\boldsymbol{Q_3}=1{,}6 - 0{,}0029\boldsymbol{ДЗ} - 0{,}546\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 1{,}208\boldsymbol{h_{кол}} + 0{,}00108\,\boldsymbol{ДЗ\cdot d_ф/d_{б.с.}} + 0{,}00145\,\boldsymbol{ДЗ\cdot h_{кол}} + 0{,}499\,\boldsymbol{d_ф/d_{б.с}\cdot h_{кол}} + 0{,}00000256\,\boldsymbol{ДЗ^2}. \quad (19)$$

Степень содержания метана в биогазе, %:

$$\boldsymbol{C}=63{,}24 + 0{,}076\boldsymbol{ДЗ} - 0{,}036\,\boldsymbol{ДЗ\cdot d_ф/d_{б.с.}} - 0{,}0002\,\boldsymbol{ДЗ^2}. \quad (20)$$

Энерговыделение, МДж/ $м^3$ РОАФ в сут.:

$$\boldsymbol{Q_5}=78{,}88+1{,}65\boldsymbol{ДЗ} - 58{,}78\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 32{,}01\boldsymbol{h_{кол}} - 0{,}61\,\boldsymbol{ДЗ\cdot d_ф/d_{б.с.}} - 0{,}0014\,\boldsymbol{ДЗ^2}. \quad (21)$$

Энергоотдача, МДж/ кг АСОВ:

$$\boldsymbol{Q_6}=25{,}9 - 0{,}017\boldsymbol{ДЗ} - 5{,}59\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 10{,}33\boldsymbol{h_{кол}}. \quad (22)$$

Степень разложения, %

$$\boldsymbol{Ср}=107{,}438 + 0{,}0262\boldsymbol{ДЗ} - 23{,}63\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 71{,}96\boldsymbol{h_{кол}} + 41{,}23\,\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}h_{кол}} - 0{,}0003\,\boldsymbol{ДЗ^2}. \quad (23)$$

Степень понижения потребления кислорода (по ХПК):

$$\boldsymbol{Пк}=8{,}8 + 0{,}00017\boldsymbol{ДЗ} - 3{,}56\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}} - 11{,}15\boldsymbol{h_{кол}} + 7{,}11\,\boldsymbol{d_ф/d_{б.с.}h_{кол}} - 0{,}00003\,\boldsymbol{ДЗ^2}. \quad (24)$$

Анализ данных выявил, что наиболее значимое влияние оказывает фактор дозы загрузки (ДЗ). Влияние фактора ДЗ для параметров, учитывающих количественную сторону выхода биогаза – положительное, а для параметров, указывающих качественную сторону – отрицательное. Это объясняется тем, что повышение объема загрузки влечет увеличение количества органических веществ, загружаемых на обработку, в результате повышается выход биогаза. Но повышение дозы загрузки влечет и снижение глубины разложения, вследствие сокращения времени оборота. В результате выбор рациональной дозой загрузки невозможен, так выбор должен определяться требованиями переработки, либо это получение энергоносителя – биогаза, или же получение максимальной степени разложения органического вещества, либо компромиссное решение.

Вторым по значимости и степени влияния фактором является $h_{кол}$ - высота колебания стоков в баке сифона. Коэффициенты регрессии данного фактора во всех уравнениях отрицательные. Понижение уровня колебания стоков в сифоне повышает частоту циклов возмущения. Что реализуется за счет уменьшения времени фазы заполнения и опорожнения. Опыты показали, что повышение уровня колебания в баке сифона не вызывает должного повышения колебания давления в газовом объеме фильтра и скорости движения свободной поверхности. Рекомендуемое значение высоты колебания для имеющейся установки – 0,2 метра.

Фактор $d_ф/d_{б.с.}$ – соотношение диаметра фильтра к диаметру бака сифона, оказывает при понижении однозначно положительное влияние на все оценочные параметры. Уменьшение этого соотношения приводит к сокращению времени фаз заполнения и опорожнения, т.е. всего цикла возмущения, что повышает частоту

циклов. Необходимо отметить, что снижение отношения данных диаметров приведет к повышению скорости движения и амплитуды колебания свободной поверхности стоков в фильтре, а также увеличит перепад давления в газовом объеме фильтра. Результаты опыта на демонстрационной установке показали отрицательное действие чрезмерного уменьшения этого соотношения, поэтому значение 1:1 можно принять как рациональное.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований предлагается технология анаэробной переработки навозных стоков с применением анаэробного фильтра с сифонным отводом (см. рис.к 8).

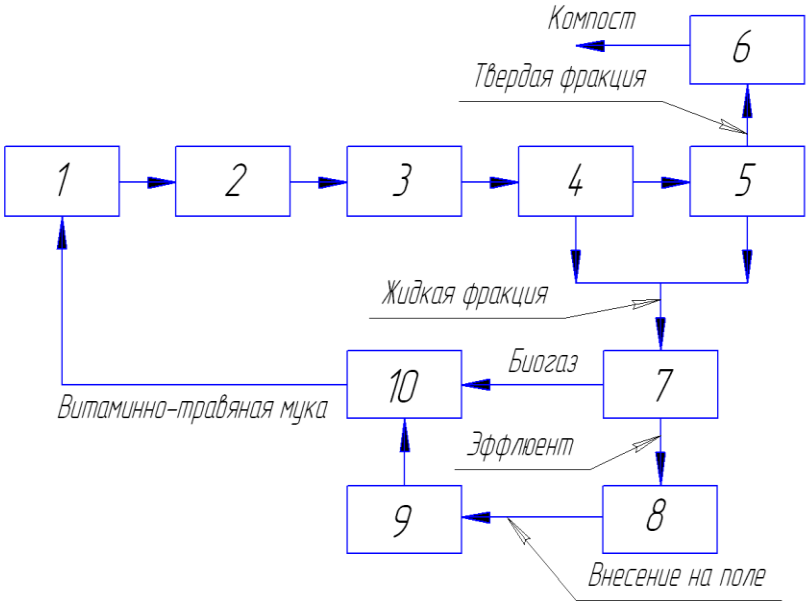


Рисунок 8 – **Технологическая линия анаэробной переработки навозных стоков свиноводческого комплекса**: 1 – животноводческое помещение с гидросплавной системой навозоудаления; 2 – приемный резервуар; 3 – насосная станция; 4 – устройство для механического разделения на фракции I ступени (дуговые сита); 5 – шнековый разделитель; 6 – установка по ускоренному компостированию; 7 – анаэробный фильтр с сифонным отводом; 8 – иловые карты; 9 – возделывание сельскохозяйственных культур; 10 – агрегат для приготовления витаминно-травянной муки.

Технология направлена на раздельную обработку твердой и жидкой фракции навозных стоков. Жидкая фракция – навозные стоки подвергаются метановому сбраживанию в анаэробном фильтре с сифонным отводом с получением биогаза и органических удобрений. Биогаз утилизируется в агрегате для приготовления витаминно-травянной муки. Удобрения вносятся на сельскохозяйственные угодья, где возделываются однолетние травы для приготовления витаминно-травянной муки. Твердая фракция подвергается ускоренному компостированию в специальных установках. Полученный компост реализуется населению, либо вносится на поля.

**В пятой главе** приведены расчеты экономической эффективности от внедрения технологии анаэробной переработки навозных стоков с применением анаэробного фильтра для СХПК «Усольский свинокомплекс» Усольского района Иркутской области с годовой программой 108 тыс. свиней. Годовой экономический эффект составит 14 972,7 тыс. руб. Срок окупаемости 6,9 года.

## *ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ*

1. Установлено, что повышение эффективности анаэробного сбраживания возможно за счет интенсификации массообменных процессов. Анализ методов и способов интенсификации выявил, что необходимо создание гидродинамических возмущений за счет изменения скорости движения свободной поверхности жидкости в фильтре. Предложена конструкция анаэробного фильтра с сифонным от-

водом, которая позволяет создавать гидродинамические возмущения за счет изменения скорости субстрата в фильтре, имеющие циклический характер.

2. Разработана гидравлическая модель фазы опорожнения анаэробного фильтра с сифонным отводом. Выявлены наиболее значимые факторы, такие как – доза загрузки, диаметр фильтра и бака сифона, диаметр сифонного трубопровода, напор сифона, уровень колебания жидкости в баке сифона.

3. Получены регрессионные модели основных технологических оценочных параметров. Рациональное значение дозы загрузки выбирается исходя из целей переработки, для повышения выхода биогаза – увеличение ДЗ, а для повышения степени разложения – уменьшение ДЗ; уровня колебания в баке сифона – 0,2 метра; соотношение диаметров фильтра и бака сифона – 1:1.

4. Разработана технология и технологическая линия анаэробной переработки навозных стоков свиноводческих предприятий. Реализована раздельная обработка твердой и жидкой фракции биологическими способами. Жидкая фракция обрабатывается в анаэробном фильтре с сифонным отводом, с получением биогаза и жидких органических удобрений. Твердая фракция подвергается аэробной биотермической обработке в установках ускоренного компостирования.

5. Внедрение технологической линии анаэробной переработки позволит утилизировать навозные стоки с соблюдением требований экологической безопасности, с учетом максимального извлечения удобрительной и энергетической ценности. Годовой экономический эффект составил 14 972,7 тыс. руб., который слагается в результате энергетической, экологической и удобрительной составляющей. Срок окупаемости – 6,9 года.

*Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:*

*а) публикации в изданиях рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ:*

1. Васильева А.С. Теоретические основы и экспериментальные исследования анаэробного фильтра / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 12 (134). – С. 142-146.

2. Васильева А.С. Метантенк с фиксированной биомассой / А.С. Васильева // Вестник ИрГСХА. - 2014, вып. 65. - С. 84-91.

3. Васильева А.С. Анаэробный фильтр с циклическим возмущением / А.С. Васильева, В.К. Евтеев, Ф.А. Васильев // Вестник АПК Ставрополья. – 2015, вып. 4 (20). - С. 24-28.

*б) публикации в других изданиях:*

4. Евтеев В.К. Анаэробный фильтр с циклическим возмущением / В.К. Евтеев, А.С. Васильева // Природопользование и аграрное производство: Сб. статей междунар. науч.-практ. конф.. - Иркутск: ИрГСХА, 2012. – С. 26-30.

5. Васильева А.С. Создание возмущений в анаэробном фильтре / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Мат. науч.-практ. сем., посвященного Дню аспиранта ИрГСХА. - Иркутск: ИрГСХА, 2013. – С. 17-21.

6. Васильева А.С.Теоретические основы создания возмущений в анаэробном фильтре / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Сб. науч. тр. Серия: Технологии и технические средства в АПК. Вып. 10. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2014. – С. 210-216

7. Васильева А.С. Гидравлические основы работы анаэробного фильтра с циклическим возмущением / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Научные исследования и разработки к внедрению в АПК. – Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2013. – С. 216-221.

8. Васильева А.С. Планирование и методика проведения экспериментальных исследований на демонстрационной установке / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Научно-практический журнал «Актуальные вопросы аграрной науки». - Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2014. – С. 41-46.

9. Васильева А.С. Результаты экспериментальных исследований на демонстрационной установке анаэробного фильтра /А.С. Васильева, В.К. Евтеев //Экологическая безопасность и перспективы развития аграрного производства Евразии: Мат. междунар. науч.-практ. конф., посв. 60-летию аспирантуры ИрГСХА. Часть I. - Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2013. – С.12-17.

10. Васильева А.С. Планирование и методика проведения экспериментальных исследований анаэробного фильтра с сифонным отводом / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Современные проблемы и перспективы развития АПК: Мат. регион. науч.-практ. конф. с междунар. уч., посвященной 80-летию ФГБОУ ВПО ИрГСХА. Часть I. - Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2014. – С. 204-209.

11. Васильева А.С. Обзор иммобилизационных материалов / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: мат. III междунар. науч.-практ. конф. - Иркутск: изд-во ИрГСХА, 2014. - С. 119-124

12. Васильева А.С. Технология биологической переработки животноводческих стоков / А.С. Васильева, В.К. Евтеев // Внедрение инновационных технологий создания конкурентоспособной продукции импортозамещения в сельском хозяйстве региона: мат. регион. науч.-практ. конф. аспир. и мол. уч., посв. Дню российской науки, Дню аспиранта и 100-летию со дня рождения А.А. Ежевского. – Иркутск: изд-во ИрГАУ, 2015. – С. 70-74.

13. Васильева А.С. Методика расчета экономической эффективности технологии анаэробной переработки животноводческих стоков с учетом фактора времени / А.С. Васильева, В.К. Евтеев, Ф.А. Васильев // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: мат. IV междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск: издательство ИрГАУ, 2015. – С. 127-131.

14. Васильева А.С. Движение жидкости и газа в анаэробном фильтре / А.С. Васильева, В.К. Евтеев// Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: мат. IV междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск: издательство ИрГАУ, 2015. – С. 131 – 141.

15. Васильева А.С. Технология анаэробной переработки навозных стоков свиноводческого комплекса / А.С. Васильева, В.К. Евтеев, М.П. Таханов // Сб. науч. тр. Серия: Технология технические средства в АПК. Вып. 12. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2016. – С. 3-7.

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 070444 от 11.03.98 г.
Подписано в печать 23.01.2017 г.
Тираж 100 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский р-н,
пос. Молодежный