



Столыпинский

вестник

Научная статья

Original article

УДК 631

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗА

INVESTIGATION OF WASTE-FREE MANURE PROCESSING TECHNOLOGY

^{1,2}**Кокиева Галия Ергешевна**, доктор технических наук, декан Инженерного факультета ¹ФГБОУ ВО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова» (670024, Республика Бурятия, город Улан-Удэ, ул. Пушкина, д.8), тел. 8-924-8-66-537, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3447-1911>, kokievagalia@mail.ru

²Профессор кафедры «Информационные и цифровые технологии» ФГБОУ ВО Арктический агротехнологический университет (677007, Республика Саха (Якутия), г.Якутск, шоссе Сергеляхское, 3 км., дом.3,), тел. 8-924-8-66-537, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3447-1911>, kokievagalia@mail.ru

^{1,2}**Kokieva Galiya Ergeshevna**, Doctor of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Engineering ¹Buryat State Agricultural Academy named after. V.R. Filippova" (670024, Republic of Buryatia, Ulan-Ude, Pushkin St., 8), tel. 8-924-8-66-537, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3447-1911>, kokievagalia@mail.ru

²Professor of the Department of Information and Digital Technologies, Arctic Agrotechnological University (677007, Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Sergelyakhskoe highway, 3 km., building 3), tel. 8-924-8-66-537, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3447-1911>, kokievagalia@mail.ru

Аннотация. В современных условиях успешное решение задач по обоснованию направления технического прогресса в области механизации и

электрификации сельского хозяйства, изысканию новых технологических процессов, обоснованию заявок на создание новых машин и оборудования, по разработке методов эксплуатации техники требует применения новых методов и приемов исследования. Влияние научно-технического прогресса (НТП) на социально-экономическое развитие общества бесспорно. Однако не бесспорны наши представления о его сущности, свойствах и оценках. Разнообразие форм проявления НТП при отсутствии фундаментальных критериев и закономерностей развития производства является причиной выбора ошибочных направлений совершенствования техники и технологии и, как следствие, неблагоприятных последствий хозяйственной деятельности.

Одним из таких методов-системный анализ. Так как все указанные задачи взаимосвязаны, вначале обосновать общую методику их решения, выявить этапы работ, требуемые исходные данные, а затем разработать частные методы исследований по каждому этапу. Ниже изложена общая методика прогнозирования средств для животноводства и кратко описаны частные методики выполнения отдельных этапов работы. Быстрый рост технической оснащенности животноводческих ферм создает предпосылки для автоматизации. Здесь понимается не простое дистанционное управление механизмами, а использование полного комплекса средств автоматического управления и регулирования, позволяющих без участия человека поддерживать оптимальные режимы работы установок по заданному циклу. Удаление навоза из помещения на молочных фермах и комплексах и его дальнейшая утилизация требуют значительных затрат труда и капитализация вложений. Поэтому оптимальный выбор наиболее эффективных вариантов механизации этого процесса приобретает большое значение. Особенно актуальна эта проблема в настоящее время в связи с укрупнением молочных ферм и, как следствие, увеличением объема получаемого навоза, который надо не только удалить из помещений и выгульных площадок, но и подготовить для использования в качестве удобрения. Существует много вариантов механизации уборки и утилизации навоза, эффективность которых изучена слабо. До последнего времени не было работ по сравнительной оценке разных способов уборки и

утилизации навоза с учетом затрат труда и средств на всех операциях-начиная с удаления его из помещения и кончая внесением в почву в качестве удобрения. Среди специалистов до сих пор нет единодушного мнения о том, какую схему удаления навоза следует применять даже при одинаковых способах содержания животных, в результате чего на аналогичных молочных фермах для этого используют различные механизмы. Поголовье в сфере животноводства увеличивается с каждым годом, поэтому проблема утилизации и переработки отходов не теряет актуальности. Большинство фермеров, не утруждая себя, вывозят навоз на поля или сжигают. Насколько безопасны такие действия по отношению к окружающей среде и человеку? Ведь продукт жизнедеятельности животных может быть заражен гельминтами, личинками насекомых и семенами сорных растений. В естественных условиях навоз разлагается на гумус, воду, углекислый газ, азот, метан и аммиак. Газ выделяется в атмосферу, а часть воды под действием гравитации уходит в почву вместе с гельминтами и возбудителями заболеваний. В любой момент может возрасти активность патогенной флоры, которая заразит расположенные неподалеку растения. Вот почему выбрасывать свежий навоз без переработки, которая направит химические процессы в правильное русло, нельзя. Бесподстилочный навоз и помет представляют гораздо большую опасность для экологии, чем коммунально-бытовые отходы.

Annotation. In modern conditions, the successful solution of tasks to substantiate the direction of technical progress in the field of mechanization and electrification of agriculture, the search for new technological processes, the justification of applications for the creation of new machines and equipment, the development of methods of operation of equipment requires the use of new research methods and techniques. The impact of scientific and technological progress (STP) on the socio-economic development of society is undeniable. However, our ideas about its essence, properties and assessments are not indisputable. The variety of forms of NTP manifestation in the absence of fundamental criteria and patterns of production development is the reason for choosing the wrong direction for improving equipment and technology and, as a result, the adverse consequences of economic activity.

One of these methods is system analysis. Since all these tasks are interrelated, first justify the general methodology for their solution, identify the stages of work, the required initial data, and then develop specific research methods for each stage. The general methodology for forecasting livestock products is described below and the specific methods for performing individual stages of work are briefly described. The rapid growth of technical equipment of livestock farms creates prerequisites for automation. This does not mean simple remote control of mechanisms, but the use of a full range of automatic control and regulation tools that allow, without human intervention, to maintain optimal operating modes of installations for a given cycle. Removal of manure from the premises on dairy farms and complexes and its further disposal require significant labor costs and capitalization of investments. Therefore, the optimal choice of the most effective options for mechanization of this process is of great importance. This problem is especially relevant at present due to the enlargement of dairy farms and, as a result, an increase in the volume of manure produced, which must not only be removed from premises and paddocks, but also prepared for use as fertilizer. There are many options for mechanization of manure harvesting and disposal, the effectiveness of which has been poorly studied. Until recently, there has been no work on a comparative assessment of different methods of manure harvesting and disposal, taking into account the cost of labor and funds in all operations -from removing it from the room to applying it to the soil as fertilizer. There is still no consensus among experts on which manure removal scheme should be applied even with the same methods of animal husbandry, as a result of which different mechanisms are used on similar dairy farms. Livestock in the field of animal husbandry is increasing every year, so the problem of waste disposal and recycling does not lose its relevance. Most farmers, without bothering themselves, take manure to the fields or burn it. How safe are such actions in relation to the environment and humans? After all, the product of animal life can be infected with helminths, insect larvae and weed seeds. In natural conditions, manure decomposes into humus, water, carbon dioxide, nitrogen, methane and ammonia. Gas is released into the atmosphere, and part of the water under the influence of gravity goes into the soil along with helminths and pathogens. At any moment, the activity of pathogenic flora may increase, which will infect nearby plants.

That is why it is impossible to throw out fresh manure without processing, which will direct chemical processes in the right direction. Lint-free manure and manure pose a much greater danger to the environment than municipal waste.

Ключевые слова: анаэробный процесс, навоз, утилизация, животноводство.

Key words: anaerobic process, manure, disposal, animal husbandry.

Введение

По данным ВОЗ, они могут содержать более 100 разновидностей возбудителей различных заболеваний. Проблема усугубляется тем, что животноводческие фермы укрупняются, увеличивается поголовье скота, а значит, требования к их санитарно-гигиеническому состоянию становятся более жесткими. С этой точки зрения навоз, объемы которого неизменно растут, сегодня рассматривают уже не только как источник удобрений, но и как фактор загрязнения окружающей среды – почвы, грунта, вод, особенно на «серых» свалках. Существуют различные способы переработки навоза. Основные-компостирование с торфом и минеральными добавками; разделение на фракции в отстойниках различных конструкции; разделение в сепарирующих установках с последующей биологической обработкой жидкой фракции. Последний способ в нашей стране применяется в основном на промышленных комплексах с гидросмывной системой удаления навоза, имеющего влажность 98...99%. На строительство очистных сооружений приходится треть капитальных вложений, из них большинство половины-на систему биологической очистки (отстойники, аэротенки, пруды-накопители). Продукт жизнедеятельности накапливается, поскольку моментальных технологий переработки не существует, как и специальных безопасных участков для вывоза. Охраны окружающей среды, особенно в регионах, где ограничены возможности иметь при крупных животноводческих комплексах поля орошения, высокий уровень залегания грунтовых вод, а также развитая система внешних водоисточников. Отсутствие технологических приемов выделения из жидкой массы частиц величиной менее $(2..5)10^{-4}$ м приводит к заиливанию резервуаров осветленных стоков. Их коррозионная активность ведет к преждевременному выходу из строя

дождевальная техника. При использовании транспортных средств для вывозки неразделенных на фракции навозных стоков фактический расход топлива равен 1500т, что вместе с другими затратами составляет около 1 млн руб в год (при расходе 0,5 кг топлива на один тонно-километр и ежегодном выходе 800...900 тыс. м³ стоков). В основе действия большинства систем удаления навоза лежит принцип размывания экскрементов потоком жидкости-в основном воды. Минимальная скорость выноса частиц должна быть более 0,8 м/с, что обуславливает повышенный объем стоков при перемещении экскрементов в каналах шириной 0,6...1,5 м и реже-2м. Альтернативное удаление навоза-система непрерывного действия, основанная на свойствах экскрементов при влажности более 84% самотранспортироваться-недостаточно изучено. Использовать в качестве органических удобрений можно навоз, безопасный в гигиеническом и ветеринарно-санитарном отношении. В нем не должно быть патогенных микроорганизмов, семян сорняков, тяжелых металлов и пестицидов сверх нормы. По истечении 8–12 месяцев после образования он утрачивает опасные качества. Это свойство используют для естественного обеззараживания. Термофильная анаэробная стабилизация (биотермическая, автотермическая)-перспективный способ обработки навоза. При хорошей теплоизоляции, достаточном содержании сухого вещества и адекватной подаче воздуха в таком процессе за счет разложения некоторой части органических веществ достигается температура 50-70⁰ С, при которой гибнут патогенные микроорганизмы, гельминты и их яйца, теряют всхожесть семена сорняков. Высокая скорость процесса при этой температуре позволяет снизить капитальные затраты за счет сокращения продолжительности обработки, уменьшения объема реактора. Происходит дезодорация навоза. Полученный продукт имеет стабильные параметры и длительное время хранится без разложения. В исходную массу, кроме воздуха или кислорода, другие вещества не подаются, поэтому обработанный навоз экологически чистый и может применяться как высококачественное удобрение. Потери питательных веществ меньше, чем при других методах его обработки.

Поскольку процесс стабилизации навоза наиболее эффективно протекает при температуре 55...60⁰ С, то реактор должен быть теплоизолирован, а толщина слоя теплоизоляции -обеспечить подъем температуры до термофильного уровня при минимальной стоимости теряемой теплоты и стоимости теплоизоляции. Аналогичная задача возникает при теплоизолировании метантенка.

Основная часть

На действующих животноводческих предприятиях навоз размещают в огромные искусственные котлованы, где в течение нескольких месяцев он превращается из свежего навоза в перегной. Навозохранилища должны быть организованы так, чтобы вредные вещества не попадали в почву и реки, чтобы выбросы газов в атмосферу были минимальны [1-5].

Во время хранения навоз проходит несколько стадий и в зависимости от этого имеет разные свойства (табл.1):

Таблица 1-Вид и свойства

№п/п	Вид	Свойства
1	Свежий	угнетает рост культур, повреждает корни, поскольку содержит семена сорных растений, споры грибов, яйца гельминтов
2	Полуперепревший	можно применять только в виде водного раствора, например при осенней перекопке
3	Хорошо перепревший	рыхлый и легкий, подходит для удобрения почвы весной во время перекопки
4	Перегной	самое полезное органическое одобрение, которое применяют в качестве мульчи и как компонент почвенных смесей

Способы обработки навоза (табл.2)

Таблица 2- Способы обработки навоза

№п/п	Способ обработки	Характеристика
1	Гранулирование	Полученный продукт подходит для всех видов почв, легко растворяется в воде и не представляет опасности
2	Вермикомпостирование	Технология отличается от предыдущей тем, что в ней используют червей, перерабатывающих навоз с целью его обогащения
3	Бактериальная переработка	Для навоза создают условия, в которых бактерии активно размножаются. Уходит неприятный запах, а полезные вещества и микроэлементы сохраняются
4	Пиролиз	Сырье раскладывают на газ, твердые и жидкие продукты
5	Инсинерация	Навоз сжигают в специальных печах, а произведенный газ очищают

Необходимо совершенствование методик расчета параметров, определение условий надежности работы такой системы, изучение реальных процессов смесеобразования, условий обеспечения требуемого уровня влажности смеси, которые позволят использовать минимальное количество жидкости для поддержания устойчивого процесса транспортирования. Анализ известных зависимостей для определения параметров самотечной системы непрерывного действия показывает, что при их выводе принят ряд допущений, в результате которых физический смысл такого явления как самотранспортирование вязкопластической массы (навоза), заметно упрощался. При изменении технологических условий эти зависимости, как правило, требуют значительной корректировки.

Энергетическая программа ставит задачу широкого вовлечения в энергобаланс страны нетрадиционных источников энергии. Среди таких источников в агропромышленном комплексе страны наибольшее значение приобретает биомасса. При получении жидкого навоза необходимо дополнительно разделить его на твердую или жидкую фракции. Разделение жидкого навоза на животноводческих фермах и комплексах на твердую и жидкую фракции является одним из основных способов его обработки. Часть жидкого и полужидкого навоза подвергают метановому сбраживанию, для чего разрабатывают и осваивают соответствующее оборудование, при использовании которого получится биогаз на топливо и органическое удобрение высокого качества. Анаэробное метановое сбраживание навоза позволяет получать биогаз, ценное органическое удобрение с повышенной биологической активностью либо белково-витаминные концентраты для обогащения ими кормов. Такая переработка навоза – действенное природоохранное мероприятие, обеспечивающее его дезодорацию, снижение загрязнения почвы и воды вредными веществами и патогенной микрофлорой, выбросами в атмосферу (благодаря вытеснению биогазом традиционного органического топлива). Целесообразность накопленного внедрения анаэробной переработки навозной массы будет очевидна после широкой постановки промышленного эксперимента и всестороннего экономического обоснования [2-8]. Однако уже сейчас на

основании изучения опыта, накопленного в нашей стране и за рубежом, по проектированию и эксплуатации биоэнергетических установок можно утверждать, что их использование вместо традиционной системы экономически выгодно. Боксовое содержание дойных коров-наиболее перспективное, о чем свидетельствует накопленный опыт. Доеение проводят в специально отведенном помещении, что обеспечивает получение более качественного молока, улучшает условия труда доярок, снижает трудовые затраты. Проблема влияния отходов животноводства на загрязнение окружающей среды, особенно природных вод, остается острой. Отсутствуют обобщенные сведения об их распределении на удобрение и сброс. Следует отметить, что загрязнение вызывается не только жидким навозом, но и силосным соком. До сих пор полностью не решена проблема использования всех отходов животноводства крупных ферм. Большой запас энергии, заключенный в биомассе, которой располагает сельское хозяйство, способствует постоянному поиску и разработке перспективных технологий ее извлечения. К числу таких технологий относится анаэробная метангенерация.

Целесообразность широкого внедрения анаэробной переработки навозной массы будет очевидна после широкой постановки промышленного эксперимента и всестороннего экономического обоснования. Однако уже сейчас на основании изучения опыта, накопленного в нашей стране, по проектированию и эксплуатации биоэнергетических установок (БЭУ) можно утверждать, что их использование вместо традиционной системы экономически выгодно. Как правило, сметная стоимость систем переработки стоков, включающих БЭУ, несколько выше аналогичных по мощности традиционных систем. Однако это увеличение средств компенсируется в процессе эксплуатации БЭУ получением товарного биогаза, высококачественного органического удобрения, снижением загрязнения окружающей среды. Для широкого внедрения БЭУ на животноводческих предприятиях необходимо специальное оборудование, потребность в котором определяется потенциальным объемом стоков для переработки в биогаз и органическое удобрение. Для реализации анаэробной обработки биомассы создаются различные технические средства как в нашей

стране, так и за рубежом. Для перемешивания навоза использовали лопастную мешалку. Чтобы стимулировать газообразование, повысить эффективность перемешивания и предотвратить коркообразование, в газовой полости реактора поддерживали невысокое разрежение путем постоянного отвода образующегося биогаза в соответствии с заданной программой. В период пуска установки суточные дозы загрузки реактора составили 6...8 м³ (4,8...6,4%). Затем после замены полного объема реактора доза суточной загрузки была увеличена до 10% объема с автоматической подачей дробных порций 24 раза в сутки. В целом процесс анаэробной переработки навоза, контролируемый по температуре, выходу биогаза, содержанию сухого и органического вещества в загружаемой и сброженной биомассе, рН, летучим жирным кислотам и другим техническим показателям, шел удовлетворительно. Однако продуктивность биореактора по генерации газа резко колебалась. Основная причина этого – нестабильность поступления навоза, что связано с нарушениями его удаления с фермы. Падение выхода биогаза связано с поломкой механизмов транспортировки навоза из помещений фермы, подачей массы повышенной влажности. При возобновлении нормальной подачи навоза выход биогаза быстро восстанавливался.

В зависимости от метода содержания животных, типа их кормления, количества и качества подстилочного материала и способа удаления на молочных фермах получают твердый, полужидкий или жидкий навоз. Для удаления твердого и полужидкого навоза используют скребковые транспортеры, скреперные установки, самоходные шасси и тракторы с бульдозерной навеской, а для удаления жидкого-гидравлические системы и насосы различных типов. Твердый подстилочный навоз чаще всего вывозят с фермы в тракторных прицепах. При бесподстилочном содержании или ограниченном использовании подстилки (опилки, резаная солома) навоз из помещения до навозохранилищ транспортируют с помощью установок циклического действия. В последние годы созданы типовые проекты коровников для боксового содержания животных с подпольными навозохранилищами. Их эксплуатация показала, что при этом почти полностью отпадает применение ручного труда для очистки мест отдыха коров и проходов от навоза.

Стоки животноводческих комплексов, прошедшие механическую очистку, подаются для хранения в накопители, где отстаиваются с образованием плавающего, осветленного и донного слоев. При дальнейшем использовании стоков для полива водопускные отверстия применяемых дождевальных агрегатов часто забиваются твердыми фракциями. На рис.1 приведена схема кавитационной обработки жидкого навоза.



Рисунок 1. Технологическая схема кавитационной обработки жидкого навоза

В процессе метанового сбраживания органические вещества минерализуются без доступа воздуха под действием анаэробных микроорганизмов, вследствие чего доля минерального азота существенно увеличивается за счет расщепления его связанных форм [4-6]. Наряду с предотвращением прямых потерь органических питательных веществ обрабатываемой массы достигаются ее обеззараживание и девитализация (потеря всхожести семян сорных растений), устранение неприятного запаха. Изучение физических и микробиологических показателей навоза, а также их зависимостей от режима и методов обработки позволило проанализировать известные технологические схемы и оборудования для метанового сбраживания органических отходов и получения из него кормовых добавок [3,7].

Выделяющийся в процессе сбраживания биогаз содержит 60...70% метана и 30...40% двуокиси углерода. Накапливается он в газгольдере 10 низкого давления. Около 30% его затрачивается на поддержание температурного режима в метантенке. При достаточной производительности установки (более 300 м³) биогаз можно применять для производства кормовых белковых добавок (содержание протеина до 70%). В нашем институте разработаны для этого соответствующие технология и оборудование.

Неоспоримое преимущество установки перед другими – простота в обслуживании, высокие надежность, производительность и качество переработки исходного сырья. Разработана установка для микробиологической переработки навоза, птичьего помета и других органических отходов в обезвоженные, экологически чистые органические удобрения (твердые, пастообразные, жидкие) с получением биогаза. Немаловажным также является расчет оптимальной толщины тепловой изоляции метантенка. В ряде практических случаев, например, нагревательных, термостабилизирующих и теплоаккумулирующих установок, целесообразно уменьшать теплообмен между ними и окружающей средой. Для этого в общем случае применяют ее термическое сопротивление, а также стоимость. При этом возникает оптимизационная задача определения толщины теплоизоляционного покрытия. Теплоизоляция снижает потери тепловой энергии при микробиологической переработке отходов (навоза) с метановым сбраживанием, где бродильным резервуаром служит лабораторной ферментационной установки в виде горизонтально расположенной цистерны. Он представляет собой цилиндр с плоскими торцами, стенки которого покрыты однослойной тепловой изоляцией. Толщину стенок цилиндра и теплоизоляционного слоя принимают однородной и их физические параметры постоянными.

Для решения задачи по выбору толщины теплоизоляционного слоя были приняты следующие исходные условия: реактор для обработки навоза-цилиндр, толщина стенки которого мала по сравнению с внутренним и внешним диаметрами; продолжительность процесса – 7-10 сут (контактный режим), за это время навоз в реакторе идеально перемешивается, поэтому для описания полей температуры и концентрации сухого вещества достаточно одного значения того или иного параметра; масса его незначительна по сравнению с массой загруженного навоза.

На основании материального и теплового балансов получена система дифференциальных уравнений, описывающих одностадийный режим обработки навоза в реакторе идеального перемешивания (1):

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= D (S_0 - S) - \frac{dF}{dt} + K_d X, \\ \frac{dX}{dt} &= (X_0 - X) + Y \left(\frac{dF}{dt} \right) - K_d X, \\ \frac{dT}{dt} &= \rho c V / (m_b C_b + \rho c V) \left[\left(\frac{H_r}{\rho c} * \frac{dF}{dt} \right) - \beta (T - T_{in}) - h \left(T + \frac{H_v}{C_v} \right) + D(T_0 - T_{in}) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

При $h = Q_a C_v / \rho c V$ (H (T)-H (T_{in})),

$$\beta = \frac{Q}{V} + \frac{Q_a \rho_a}{\rho c V} + \frac{\lambda \delta}{\rho c V} + Q_a C_v H(T_{in}) / \rho c V,$$

$$\frac{dO_2}{dt} = \frac{(\rho O_2) T_{eff} Q_a}{V} - \left(\frac{adF}{dt} + bX \right),$$

Где S- концентрация сухого вещества в реакторе, кг/м³; t- время, с;

$D = \frac{Q}{V}$ скорость разбавления, с⁻¹;

S₀ -концентрация сухого вещества в исходном навозе, кг/м³;

$\frac{dF}{dt}$ -скорость разложения сухого вещества, кг/(м³*с);

K_d -константа распада микроорганизмов, с⁻¹;

X-концентрация термофильных микроорганизмов в реакторе, кг/м³;

X₀- концентрация термофильных микроорганизмов в исходном навозе, кг/м³;

Y-прирост биомассы микроорганизмов на кг разложенного сухого вещества, кг;

T-температура в реакторе, °C; ρ-плотность навоза, кг/м³;

c-удельная теплоемкость навоза, Дж/(кг *°C);

V-объем реактора, м³;

m_b-масса реактора, кг;

C_b-удельная теплоемкость материала реактора, Дж/(кг *°C);

H_r-удельная теплота разложения сухого вещества, Дж/кг;

T_{in} -температура окружающей среды, °C;

H_v-удельная теплота парообразования, Дж/кг;

C_v-удельная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг *°C);

T₀-температура исходного навоза, °C;

Q_a -расход воздуха, м³/с;

$H(T_{in})$, $H(T)$ -абсолютная влажность входящего и выходящего воздуха соответственно, кг/м³;

Q -подача навоза, м³/с;

Q_a -плотность воздуха, кг/м³;

C_a -удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг *°C);

λ -полный коэффициент теплопередачи от навоза к окружающей среде, Вт/(м²*C);

δ -площадь поверхности реактора, м²;

O_2 -концентрация кислорода в реакторе (раствор +газ), ρ_{O_2} -плотность кислорода,

кг/м³;

T_{eff} -коэффициент использования кислорода, % (долей единицы);

a - масса кислорода, необходимая для окисления 1 кг биоразлагаемого вещества,

кг (при термофильных температурах $a=4$, при мезофильных – $a=2,0$); b - масса

кислорода, необходимая для поддержания жизнедеятельности 1 кг биомассы

микроорганизмов,кг.

Для решения задачи воспользуемся первым и третьим уравнениями системы. Пренебрегая выносом теплоты выходящим воздухом, ее потерями на испарение, массой реактора по сравнению с массой навоза, концентрацией микроорганизмов по сравнению с концентрацией сухого вещества и учитывая, что для конкретного режима $D=0$, они примут вид:

$$\frac{dS}{dt} = -dF/dT, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{H_r}{\rho c d F} - \beta(T - T_{in}) \quad (3)$$

Предположим, что скорость разложения сухого вещества прямо пропорциональна концентрации разлагаемого (модель реакции первого порядка).

Тогда:

$$\frac{dF}{dT} = K(T)(S - WS_0) \quad (4)$$

Где K -константа распада, зависящая от температуры, c^{-1} ;

W -доля небиоразлагаемого вещества в сухом (30%- в активном иле, 60%- в навозе КРС). Оценить (T) при температуре до $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ можно по формуле:

$$K(T) = 1,8710^{-6}1,047^{(T-20)} \quad (5)$$

Условие саморазогрева- $T^i(t) > 0$, при достижении максимума $-T^i(t)=0$. Следовательно, для получения максимальной температуры (T_{max}) должно выполняться условие:

$$\beta = \lambda\delta/\rho c \leq [K(T_{max})(S - SW_0)H_r]/(T - T_{in})\rho c \quad (6)$$

Экспериментально установлено, что степень разложения сухого вещества в процессе достижения максимальной температуры составляет примерно 20...25 % то есть $S(T_{max})=(0,75...0,8)S_0$.

$$\lambda \leq 0,2S_0K(T_{max}) H_r V/(T_{max} - T_{in})\delta \quad (7)$$

Для расчета необходимой толщины теплоизоляции в нашем случае можно воспользоваться выражением для полного коэффициента теплопередачи через плоскую стенку:

$$\lambda = 1/(\alpha_1 + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{d_1}{\lambda_2} + d_2/\lambda_2) \quad (8)$$

Где α_1 -коэффициент теплоотдачи от навоза к стенке метантенка, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{*C})$;

α_2 - коэффициент теплоотдачи от теплоизоляции в окружающую среду; $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{*C})$;

d_1 -толщина стенки реактора, м;

λ_1 -коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{*C})$;

d_2 -толщина слоя теплоизоляции, м;

λ_2 - коэффициент теплопроводности теплоизоляции, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{*C})$;

Комбинируя выражение (6) и (7), получим:

$$d_2 \geq \lambda_2 \left[(T_{max} - T_{in})\delta / 0,2S_0K(T_{max}) H_r V - 1/\alpha_1 - 1/\alpha_2 - \frac{d_1}{\lambda_2} \right] \quad (9)$$

Для уменьшения теплотерь целесообразно выбирать форму резервуара с минимальной поверхностью при данном объеме, например цилиндр, имеющий высоту, равную диаметру основания при отношении:

$$\frac{\delta}{V} = 3/(V/2\pi)^{1/3} = 3r,$$

где r-радиус цилиндра. Для такого реактора выражения (9) записывается

так:

$$d_2 \geq \left[\frac{15\lambda_2(T_{max}-T_{in})}{\frac{3}{V} S_0 K(T_{max}) H_r} \right] - \frac{\lambda_2}{\alpha_1} - \frac{\lambda_2}{\alpha_2} - \lambda_2 d_1 / \lambda_1 \quad (10)$$

По выражению (10) определяется нижний предел толщины теплоизоляции, при которой возможно достижение термофильных температур, но без определения времени выхода на термофильный режим, которое при толщине слоя, близкой к пороговой, и большом тепловом напоре может оказаться очень велико. С увеличением толщины время выхода на режим сокращается. Поэтому для практических целей необходимо полученное значение (d_2), как минимум, удвоить. Из этого выражения следует также, что с увеличением объема реактора и начальной концентрации сухого вещества необходимая толщина уменьшается. С другой стороны, стоимость эксплуатации теплоизоляции (C) складывается из стоимостей ее теряемой теплоты:

$$C = \lambda\delta (T_{max} - T_{in}) * T_{\text{экспл}} q_e \delta + d_2 g_{is} \quad (11)$$

Где $T_{\text{экспл}}$ -время эксплуатации,с; q_e -тариф на тепловую энергию, руб/ Дж; g_{is} -стоимость теплоизоляции, руб/м³.

Для определения оптимальной толщины теплоизоляции надо решить задачу при (C_{min}) и выражения (9). Минимум достигается при значении d_2 , которое обозначим через d_2 .

$$d_2 = \sqrt{[\lambda_2 (T_{max} - T_{in}) T_{\text{экспл}}] q_e / g_{is}} - \frac{\lambda_2}{\alpha_1} - \frac{\lambda_2}{\alpha_2} - \lambda_2 d_1 / \lambda_1 \quad (12)$$

Существенно, что d_2 не зависит ни от объема, ни от площади поверхности и возрастает пропорционально $\sqrt{q_e/g_{is}}$. По этой формуле одновременно решается задача оптимизации толщины теплоизоляции метантенка.

Следовательно, для выбора оптимальной толщины теплоизоляции надо сравнить полученные значения из выражении (9) и (12) и выбрать большее, при котором обеспечивается минимизация стоимости тепловых потерь на необходимом температурном уровне. Существенное значение при этом приобретает правильный выбор периода эксплуатации ($T_{\text{экспл}}$). Нормативный срок службы до списания (5-7 лет) приводит к неоправданному завышению толщины теплоизоляции. В течение этого срока возможно изменение соотношения цен на нее и энергию. Поэтому для оценки толщины теплоизоляции в качестве компромиссного срока нами предлагается 1 год.

Навоз имея большой запас потенциальной энергии, является существенным источником загрязнения воздуха, почвы, воды. По масштабам загрязнения окружающей среды животноводческие комплексы сопоставимы с крупными промышленными предприятиями. В нашей стране и за рубежом ведется разработка экологически чистого и энергосберегающего производства продукции животноводства.

Однако из решения-создание животноводческих комплексов с системой рекуперации теплоты животных и переработки жидкого навоза методом анаэробной ферментации в специальных установках, позволяющих получать биогаз и обеззараженные органические удобрения. Энергия, заключенная в 1 м^3 биогаза, эквивалентна энергии $0,6 \text{ м}^3$ природного газа, $0,74 \text{ л}$ нефти, $0,65 \text{ л}$ дизельного топлива. Для получения же 1 м^3 биогаза на установке (рис.1) требуется $0,07...0,10 \text{ м}^3$ жидкого свиного навоза влажностью $92...93\%$.

Опыт эксплуатации биогазовых установок показывает, что их экономические показатели существенно зависят от способа использования газа. В настоящее время наиболее распространено сжигание биогаза в котлах для получения теплой воды или пара. Однако не экономично, так как результаты зависят от размеров животноводческого комплекса, времени года и,

следовательно, объемов получаемого биогаза. Наиболее рационально использование биогаза в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. На рис.1 приведена принципиальная схема оборудование микробного синтеза

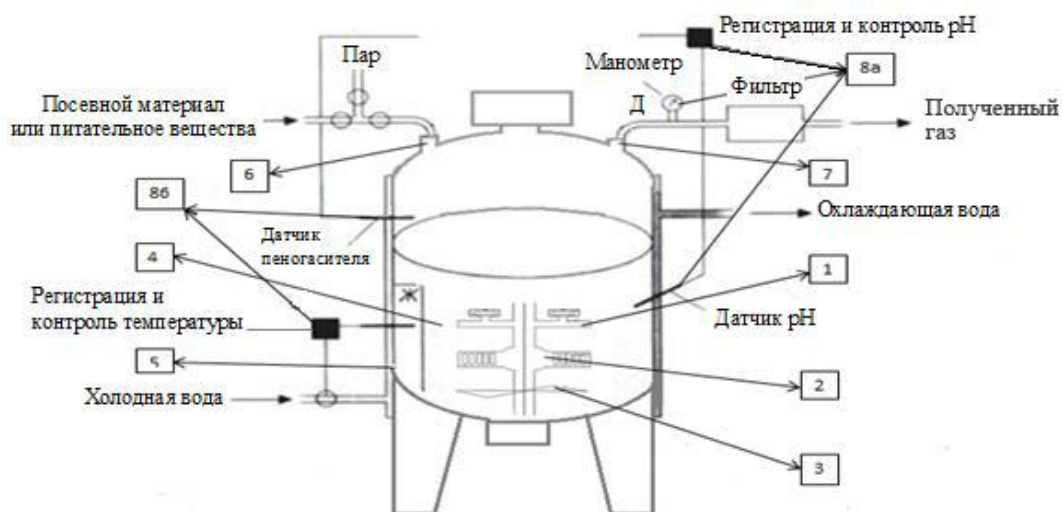


Рисунок 1. Принципиальная схема лабораторной ферментационной установки: 1–верхняя лопатка мешалки; 2–средняя лопатка; 3–нижняя лопатка; 4–корпус; 5–охлаждающая рубашка; 6– трубопровод подачи питательных веществ; 7 – трубопровод выпуска отработанного кислорода с манометром; 8– нижняя мешалка; 9– выгрузной патрубок; 10 –основание; 11,12–патрубки; 13 – редуктор

В процессе метанового сбраживания органические вещества минерализуются без доступа воздуха под действием анаэробных микроорганизмов, вследствие чего доля минерального азота существенно за счет расщепления его связанных форм. Наряду с предотвращением прямых потерь органических питательных веществ обрабатываемой массы достигаются ее обеззараживание и девитализация (потеря всхожести семян сорных растений), устранение неприятного запаха. Установка работает в автоматическом режиме, снабжена системой управления и контроля. Все технологическое оборудование (насосы, средства контроля и автоматики и т.п) размещено в блок-контейнере. Выделяющийся в процессе сбраживания биогаз содержит 60...70% метана и 30...40% двуокиси углерода. Накапливается он в газгольдере низкого давления.

Около 30% его затрачивается на поддержание температурного режима в метантенке. При достаточной производительности установки биогаз можно применять для производства кормовых белковых добавок (содержание протеина до 70%). Неиспоримое преимущество установки перед другими-простота в обслуживании, высокие надежность, производительность и качество переработки исходного сырья.

В процессе экспериментальных исследований были получены следующие данные. Интенсивность перемешивания культуральной жидкости напрямую связано с конструктивной особенностью аэратора (барботера), она же и определяет его производительность. Определение $K_L a$ по удельной энергии, затраченной на компенсирование воздуха, введенного на аэрацию предлагается определить по формуле:

$$K_L a = 140(N_v^r)^{0.5} + 130 \quad (13)$$

Однако, зависимостью (1.44) не отражается влияние на $K_L a$ конструктивных элементов аппарата, W_r рабочего давления воздуха.

Мощность, которая вкладывается на перемешивание можно разделить на две части, одна из которых ответственна за турбулизацию и интенсивность массообмена, а вторая за скоростной режим циркуляции и интенсивность перемешивания.

$$N_v = N_t + N_{ц} \quad (14)$$

где N_v - удельная мощность, подводимая к потоку, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-3}$; N_t - составляющая мощности на турбулизацию, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-3}$; $N_{ц}$ - составляющая мощности на циркуляцию, $\text{кВт} \cdot \text{м}^{-3}$.

Значение коэффициента массопередачи независимо от конструкции газораспределения для одинаковых соотношении и аппарата с увеличением числа ярусов непрерывно возрастает по экспоненте:

$$K_L a \sim M_{я}^c \text{ при } M_{я} \geq 4 \quad (15)$$

Показатель степени имеет постоянное значение для данной установки с механическим перемешиванием, состоящим из трех ярусов мешалок.

На рис.2 изображен процесс культивирования микроорганизмов с одной мешалкой



Рисунок 2. Влияние на KL_a числа ярусов на конструктивную особенность газораспределения

На рис.3 изображен процесс культивирования микроорганизмов с тремя мешалками



Рисунок 3. Влияние на KL_a числа ярусов на конструктивную особенность газораспределения (аппараты с многоярусной мешалкой)

В таблице 3 приведены технические характеристики различных биоэнергетических установок данной конструкции.

Таблица 3-Технические характеристики различных биоэнергетических установок данной конструкции

Объем метан-тенка, м ³	Габаритные размеры		Производительность			Использование биогаза	Потребитель
	Диаметр, м	Высота, м	По исходному субстрату, м ³ /сут.	По биогазу, м ³ /сут.	В пересчете на электро-энергию, кВт*ч		
0,2	0,6	1,3	0,02	0,02	1,4	На бытовые нужды	
0,5	0,9	1,2	0,05	0,5	3,2		
1,0	1,1	1,4	0,1	1,0	6,4		
2,0	1,4	1,7	0,2	2,0	12,8		Частный сектор
5,0	1,8	3,5	0,5	5,0	32,0		
10,0	2,3	4,2	1,0	10,0	64,0		
25,0	3,4	4,8	5,0	75,0	480,0	На производство электроэнергии, теплоты	Мелкие фермы
50,0	4,8	5,8	10,0	150,0	960,0		
125,0	5,4	7,6	25,0	375,0	2400,0		Средние фермы
300,0	7,3	9,6	60,0	900,0	5760,0		

500,0	8,6	10,0	100,0	1500,0	9600,0	На произво дс-тво кормово го белка	Живо тно- водче ские комп лексы
1000,0	10,7	13,2	200,0	3000,0	19200,0		
3000,0	15,6	19,7	600,0	9000,0	576000,0		

Производительность технологического оборудования выбирают исходя из продолжительности его работы, не превышающей длительности рабочей смены ($t_p < t_{см}$), при возможности использования для тепловых нужд фермы.

Минимальная тепловая мощность:

$$W_{min} = G_6 q_{п} / t_p = 2\ 150 \text{ МДж/ч}, \quad (16)$$

где $q_{п}$ – теплотворная способность природного газа, $q_{п} = 33,5 \text{ МДж/м}^3$.

Наиболее близкий типоразмер котла, работающего на природном газе, – КГ-1 500 производительностью 1 500 кг пара в 1 ч. При работе на биогазе тепловую мощность можно найти по следующей формуле:

$$W_k = 1\ 500 q_{п} / C_6 = 2\ 380 \text{ МДж/ч}. \quad (17)$$

В основу технико-экономического расчета положена методика определения экономического эффекта с учетом прибыли, получаемой от утилизации товарного биогаза, улучшения удобрительных свойств навоза и повышения степени его обеззараживания. За год на ферме, где содержится 400 голов крупного рогатого скота, требуется переработать $12\ 975 \text{ м}^3$ навоза. Известно, что 1 т хорошо подготовленного навоза в буртах дает прибавку к урожаю 100 корм.ед. за севооборот, а 1 т сброженного навоза эффективнее буртового (повышение урожайности) на 10...15 %. Следовательно, годовая прибавка урожая составит $13 \cdot 10^4$ корм. ед. При себестоимости 1 корм. ед. 8 коп. это даст 10 400 руб. прибыли.

Эффект (\mathcal{E}_1) от улучшения удобрительных свойств навоза и его обеззараживания составляет 52 547 руб. Для определения общего экономического эффекта за базовую принята ферма на 400 животных с аэробной

системой разложения навоза [1,8]. Навоз самотеком поступает в приемный резервуар насосной станции, откуда по мере накопления фекальными насосами 4НФ направляется в резервуары для аэробного разложения. Стоимость сооружений и оборудования составляет 144 тыс. руб. Стоимость машин, оборудования и сооружений для новой технологии переработки навоза на 14 126 руб. (\mathcal{E}_3) больше, чем для базовой.

Общий экономический эффект с учетом всех составляющих:

$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3 = 52\,547 + 6\,388 - 14\,126 = 44\,809$ руб., где \mathcal{E}_2 – эффект от утилизации товарного биогаза, руб.

Переработка навоза анаэробных условиях обуславливает основу создания и внедрения в сельскохозяйственном производстве малоотходных и полностью безотходных технологий, предотвращает загрязнение окружающей среды [1-8]. Переработка животноводческих стоков анаэробным сбраживанием зависит в основном от их биохимического состава, который определяется половозрастной структурой животных, способами их содержания и кормления, суточным выделением навоза, его влажностью, зольностью и загрязненностью взвешенными, типом и количеством применяемой подстилки, объемом и загрязненностью ливневых стоков с выгульных площадок и территории ферм и комплексов, технологией навозоудаления. Анаэробное сбраживание животноводческих стоков обеспечивает дезодорацию, дегельминтизацию, уничтожение в них семян сорных растений, перевод удобрительных веществ в легкоусвояемую растениями минеральную форму, а также получения биогаза, содержащего до 80% метана.

Протекание микробного синтеза в аппаратах разного масштаба в пересчёте на единицу объёма количества получаемого продукта (биомассы или продуктов метаболизма) будет одинаковым или почти одинаковым в аппаратах разного масштаба. Эта технология позволяет реализовать на животноводческом предприятии ускоренный цикл биоконверсии веществ параллельно традиционному пути их регенерации в растениеводстве, что обеспечивает реальные возможности создания животноводческих комплексов в виде безотходных производств, удовлетворяющих всем требованиям экономики и

охраны окружающей среды. Анализ физических свойств навоза после сбраживания показал, что степень разложения абсолютно сухого беззольного вещества составила 22 % при суточной дозе загрузки 4,5 %. Влажность навоза и его зольность после сбраживания увеличиваются, что объясняется частичным расходом сухого вещества на образование биогаза. В этом случае можно обеспечить эффективное использование биогазовых установок на животноводческих фермах и комплексах, сохранение блочно-модульного принципа построения комплексов оборудования.

Вывод

Протекание микробного синтеза в аппаратах разного масштаба в пересчёте на единицу объёма количества получаемого продукта (биомассы или продуктов метаболизма) будет одинаковым или почти одинаковым в аппаратах разного масштаба. Эта технология позволяет реализовать на животноводческом предприятии ускоренный цикл биоконверсии веществ параллельно традиционному пути их регенерации в растениеводстве, что обеспечивает реальные возможности создания животноводческих комплексов в виде безотходных производств, удовлетворяющих всем требованиям экономики и охраны окружающей среды. Анализ физических свойств навоза после сбраживания показал, что степень разложения абсолютно сухого беззольного вещества составила 22 % при суточной дозе загрузки 4,5 %. Влажность навоза и его зольность после сбраживания увеличиваются, что объясняется частичным расходом сухого вещества на образование биогаза. В этом случае можно обеспечить эффективное использование биогазовых установок на животноводческих фермах и комплексах, сохранение блочно-модульного принципа построения комплексов оборудования. Предложенная конструктивная особенность оборудования решает такие технические задачи, как:

1. Увеличение рабочего полезного объёма путем высвобождения аэрирующей системы вместе с барботажным устройством.
2. Возможность пеногашения техническим решением, а именно за счет конструктивной особенности верхней мешалки перемешивающего устройства (kozyrek с прорезями волнообразной формы в козырьке).

3. Экспериментально выявлено, что:

- оптимальный диаметр мешалки, при котором производительность максимальна, находится в интервале $0,2 \dots 0,3 \leq \frac{d_m}{D} \leq 0,3 \dots 0,5$;
- от увеличения диаметра мешалки и числа оборотов мешалки производительность ферментатора не увеличилось и она находится в пределах

$$Q \left(\frac{d_m}{D} \cdot 100\% \right) \langle Q \quad \text{и}$$

$$\text{До } 400 \text{ мин}^{-1} < Q < 400 \dots 500 \text{ мин}^{-1} ;$$

чем больше плотность питательной среды, тем больше производительность, и она зависит от концентрации среды и условий производства. Характер зависимости выхода биомассы и ее концентрации от коэффициента разбавления D сохраняется, что позволяет использовать полученные зависимости при масштабировании процессов получения кормового белка из гидролизатов.

Литература

1. Бондаренко, А.М. Обоснование конструктивно-технологической схемы многофункциональной установки для разделения жидкого свиного навоза на фракции [Текст] / А.М. Бондаренко, В.Ф. Яламов, Б.Н. Строгий // Совершенствование технологий в АПК: межвуз. сб. науч. тр. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2007. – С. 112–116.
2. Бондаренко, А.М. Теоретические исследования процесса разделения навоза многофункциональной установкой [Текст] // А.М. Бондаренко, В.Ф. Яламов, Б.Н. Строгий // Вестник аграрной науки Дона. – 2008. – № 3. – С. 4–7.
3. Кокиева, Г. Е. Анализ особенностей эксплуатации аппаратов для культивирования Потенциал развития отрасли связи Байкальского региона (Новосибирск) с. 39-42, 2014г.
4. Кокиева, Г. Е. Анализ технологии измерения рабочих поверхностей при дефектации аппаратов для культивирования микроорганизмов. Научно-технический Вестник Поволжья (Казань) с 137-139, 2014г.

5. Черноволов, В.А. Процессы и аппараты [Текст]: практикум // В.А.Черноволов, Т.М. Ляшенко. – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГА, 2007. – 167 с
6. Шарифуллин, В. Н., Бояринов, Гумеров, А. М . Связь перемешивания и массопередачи на примере барботажно-эрлифтного аппарата Массообменные процессы и аппараты химической технологии(Казань) с 17-18, 1980г.
7. Шебатин, В. Г, Доманский, И. В и др. Эрлифтное транспортирование жидкостей и суспензий с 86-87, 1980г.
8. Черноруцкий, И // Г. Методы оптимизации в теории управления: учебное пособие(Санкт-Петербург: Питер) с. 256,2000 г.

References

1. Bondarenko, A.M. Substantiation of the constructive and technological scheme of a multifunctional installation for the separation of liquid pig manure into fractions [Text] / A.M. Bondarenko, V.F. Yalamov, B.N. Strogiiy // Improving technologies in agriculture: mezhvuz. sb. scientific tr. – Zernograd: FGOU VPO ACHGAA, 2007. – Pp. 112-116.
2. Bondarenko, A.M. Theoretical studies of the process of separation of manure by a multifunctional installation [Text] // A.M. Bondarenko, V.F. Yalamov, B.N. Strogiiy // Bulletin of agrarian science of the Don. - 2008. – No. 3. – pp. 4-7.
3. Kokieva, G. E. Analysis of the features of the operation of devices for cultivating the development potential of the communications industry of the Baikal region (Novosibirsk) pp. 39-42, 2014.
4. Kokieva, G. E. Analysis of technology for measuring working surfaces during deflection of devices for cultivating microorganisms. Scientific and Technical Bulletin of the Volga region (Kazan) from 137-139, 2014
5. Chernovolov, V.A. Processes and apparatuses [Text]: practicum // V.A.Chernovolov, T.M. Lyashenko. – Zernograd: FGOU VPO ACHGA, 2007. – 167 s

6. Sharifullin, V. N., Boyarinov, Gumerov, A. M. The connection of mixing and mass transfer by the example of a bubbling-airlift apparatus Mass transfer processes and devices of chemical technology (Kazan) from 17-18, 1980.
7. Shebatin, V. G., Domansky, I. V., etc. Airlift transportation of liquids and suspensions from 86-87, 1980.
8. Chernorutsky, I // G. Optimization methods in control theory: textbook(St. Petersburg: Peter) pp. 256,2000.

© Кокиева Г.Е., 2024 Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №5/2024.

Для цитирования: Кокиева Г.Е. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ НАВОЗА. Научный сетевой журнал «Столыпинский вестник» №5/2024.