

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК: 620.95: 631.145

Ю. Н. Сидыганов, Д. И. Мухортов, Д. Н. Шамиуров

ПУТИ ПРИМЕНЕНИЯ БИОГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ

Представлены результаты исследований переработки органических отходов агропромышленного комплекса методом анаэробного компостирования с получением энергоносителей (биогаз) и качественных удобрений. Сформулированы предложения по использованию разработанных технологий на сельскохозяйственных предприятиях Республики Марий Эл.

Введение. В современных условиях на предприятиях агропромышленного комплекса Республики Марий Эл наблюдается рост обеспеченности сельскохозяйственными машинами и агрегатами. Остро стоящая энергетическая проблема, которая усугублялась дефицитом энергетических мощностей, недостаточным уровнем централизации электроснабжения, постепенно находит различные варианты для разрешения.

Теплоснабжение животноводческих ферм и других производственных объектов, осуществлявшееся мелкими котельными, работающими на привозном жидком и твердом топливе, получает новый виток в истории развития с приходом газопроводов.

Плохая обеспеченность стойловыми помещениями, не соответствие существующих типовых проектных решений современным условиям содержания животных, отсутствие мероприятий по обеззараживанию и переработке производимого навоза – все это существенно влияет на окружающую среду.

Резко сократившееся применение минеральных и органических удобрений, почти не проводящиеся мелиоративные работы ведут к интенсивному уменьшению плодородия сельскохозяйственных угодий. Повышение содержания биогенных веществ и гумуса в почве может быть достигнуто внесением органических удобрений. При этом улучшаются ее биологические, химические свойства, водный и воздушный режимы. При недостаточно проработанной технологии переработки питательные свойства навоза могут быть существенно утрачены и он будет являться весьма опасным источником загрязнения окружающей среды. Для предотвращения заражения территории и окружающей среды, возникновения инфекционных заболеваний в хозяйстве, выявления

бактерио- и вирусносительства среди животных необходимо обеззараживать животноводческие стоки. Они являются благоприятной средой для длительного сохранения жизнеспособности яиц гельминтов и патогенных микроорганизмов. В связи с этим необходимо отказаться от практики вывоза неподготовленного навоза, получаемого в стойловый период, принять меры по его переработке и хранению с целью получения качественного органического удобрения и топлива.

Существующие способы и методы переработки навоза животных для получения органических удобрений не нашли широкого применения в Республике Марий Эл из-за неподходящих климатических условий и низкого технического уровня сельхозпроизводства. По нашему мнению, наиболее подходящим способом переработки навоза может послужить анаэробное метановое сбраживание в сооружениях, устанавливаемых непосредственно вблизи животноводческих ферм и работающих в течение теплого времени года, а при определенных условиях и круглогодично.

Переработка навоза путем метанового сбраживания имеет ряд достоинств, отличающих его от других способов переработки: выделяемый биогаз является источником энергии, получение высококачественного органического удобрения, уничтожение яиц гельминтов, семян сорных растений, подавление запаха навоза, поддержание чистоты окружающей среды, улучшение социальных условий проживания сельского населения, возможность организации безотходного производства.

Оптимальное функционирование системы человек – сельскохозяйственное производство – природная среда может быть достигнуто применением биоэнергетических установок на сельскохозяйственных предприятиях.

Цель исследования – обоснование и разработка ресурсосберегающей технологии анаэробного сбраживания различных видов навоза в различных комбинациях и пропорциях в психрофильном, мезофильном и термофильном режимах, представляющих наибольший интерес для экономических, социальных, хозяйственных и природно-климатических условий Республики Марий Эл.

Решаемыми задачами является выявление ведущих и наиболее технологичных управляемых факторов, воздействующих на процесс метангенерации.

Созданная экспериментальная установка «Биогазовые технологии» предназначена для проведения комплексных исследований в биопереработке органических отходов и поиска новых эффективных путей производства не только высококачественного удобрения, но и газовых энергоносителей, используя специфические газоразделительные технологии.

Установка включает в себя биогазовые реакторы и реактор-ферментер для проведения анаэробного фотопродуцирования водорода с использованием фототрофных микроорганизмов. Технологические параметры реакторов позволяют проводить экспериментальные исследования и технологические тесты существующих и новых режимов разложения различных органических субстанций.

Альтернативные газовые биотоплива, получаемые в результате переработки биомассы, имеют сложный многокомпонентный состав и требуют использования газоразделительных технологий для расширения сфер своего применения. Разработанный новый метод разделения, основанный на использовании селективных мембран, нашел применение в предложенной к разработке технологической схеме.

Имеющие ряд преимуществ мембранные технологии позволяют качественно извлекать из газовой смеси заданный компонент, используя мембранную абсорбцию в

противоточном режиме между жидкой и газовой фазами разделенных мембраной в мембранном контакторе. К тому же мембранные методы в большинстве случаев являются более дешевыми и экологически чистыми.

Применение рециркуляционной мембранной контакторной системы (РМК) является эффективным для разделения газов и паров, так как не требуется сжатия газа и вакуумной откачки. Как правило, РМК включает в себя два мембранных контактора (МК) [1], один из которых работает как абсорбер, а другой как десорбер. Движение жидкости между ними осуществляется в рециркуляционном режиме.

Схема газоразделительного блока представлена на рис. 1. Принцип работы МК заключается в селективной сорбции желаемых компонент подвижным жидким носителем через мембрану. Есть два главных сорбционных процесса в МК для заданной системы газ/жидкость: хемосорбция и/или физическая сорбция по закону Генри. Хемосорбция характеризуется высокой сорбционной емкостью с резко нелинейной изотермой, ограниченной уровнем насыщения; физическая сорбция характеризуется линейной изотермой и низкой сорбционной емкостью.

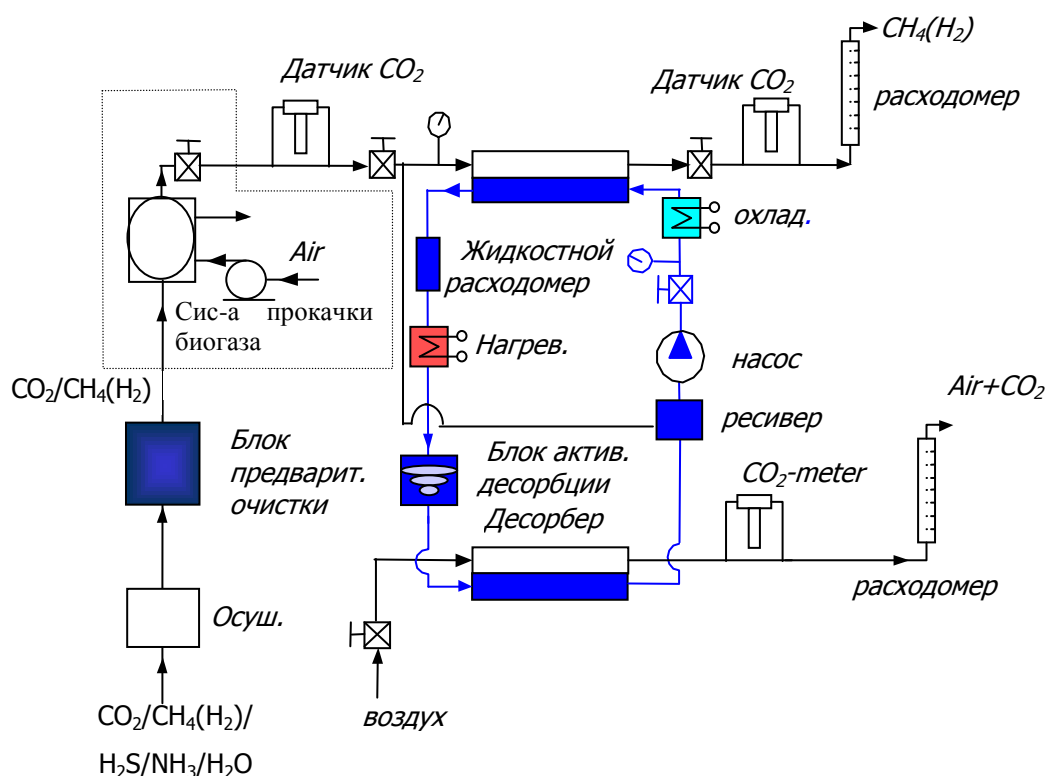


Рис. 1. Схема газоразделительного блока

Математическое моделирование. Для оптимизации процесса газоразделения разработана математическая модель массопереноса многокомпонентной смеси в МК. Модель основана на вычислении баланса массы в абсорбере и десорбере, принимая во внимание рециркуляцию потока жидкости. В работе представлено применение РМК для разделения биогаза. Даны практические рекомендации для оптимального выбора геометрических параметров и гидродинамического режима.

$$D_i \frac{\partial^2 a_i}{\partial y^2} - V \frac{\partial a_i}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$V = \frac{12L}{Hb_l^3} y(b_l - y) \quad (2)$$

$$-D_i \left. \frac{\partial a_i}{\partial y} \right|_{y=0} = j_i(x) \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial a_i}{\partial y} \right|_{y=b_l/2} = 0; \quad (4)$$

$$a_i(0, y) = a_{if} \quad (5)$$

Показано, что в случае с физическим сорбентом в качестве жидкого носителя в большинстве случаев оптимальное отношение площадей абсорбера и десорбера близко к единице.

Представленные уравнения массопереноса в жидкой фазе, в отсутствие химических реакций, описываются как: a_i – концентрация i -го компонента в жидкости; D_i – коэффициент диффузии i -го компонента в жидкости; x , y – продольная и поперечная координата, соответственно; V – скорость жидкости; b_l – толщина зазора жидкой фазы; H – ширина жидкого канала; L – поток жидкости; j_i – плотность потока i -го компонента через мембрану; a_{if} – входная концентрация i -го компонента в жидкости. Рассматривается плоская геометрия МК.

Уравнение (1) описывает диффузию i -го компонента поперек канала и его конвекцию вдоль канала. Предполагается параболический профиль скоростей (2), несущественное изменение жидкого потока вдоль канала, пренебрежимо малая теплота сорбции. Уравнения (3)–(5) являются граничными условиями для уравнения (1). Решение этой системы уравнений описывает все возможные случаи режима сорбции при различных потоках жидкости. Например, при малых потоках жидкости второй член в уравнении (1) становится несуществен, и можно предполагать постоянную концентрацию в жидкостном канале поперек него. При высоких потоках жидкости уравнение (1) описывает массоперенос в пограничном слое в жидкости.

$$\frac{d}{dx} \left[\sum_{i=1}^N j_i(x) \right] = q \quad (6)$$

$$\frac{dP_g}{dx} = \frac{3\mu_g RTl}{Hb_g^3} \frac{q}{P_g} \quad (7)$$

$$(q_i) \Big|_{x=l} = q_f c_{if}; \quad (8)$$

$$P_g \Big|_{x=l} = P_f \quad (9)$$

Система уравнений (6), (7) представляет собой математическую формулировку режима идеального вытеснения с потерями давления в газовой фазе. Уравнения (8) и (9) являются начальными условиями для (6) и (7), означающие известные параметры входного потока (величина потока, давление, состав). Здесь q_i – парциальный поток i -го компонента в газовой фазе; q – поток газа; P_g – давление газа; μ_g – вязкость газа; R –

универсальная газовая постоянная; T – температура процесса; b_g – толщина зазора газовой фазы; l – длина фаз; q_f – поток питания; c_{if} – концентрация i -го компонента в потоке питания; P_f – входное давление газа.

$$j_i(x) = Q_i (P_g c_i - K_i a_i |_{y=0}) \quad (10)$$

Система уравнений газовой и жидкой фаз связана уравнением баланса массы на границе газ–жидкость (10), описывающим массоперенос в мембране с проницаемостью Q_i за счет перепада химического потенциала, выраженного через давления, первое из которых ($P_g c_i$) представляет собой парциальное давление i -го компонента в газовой фазе, а второе ($K_i a_i |_{y=0}$) – равновесное парциальное давление i -го компонента над жидким носителем с концентрацией $a_i |_{y=0}$.

В случае отсутствия мембраны (упакованная или тарельчатая колонна) Q_i совпадает с константой прямой реакции i -й компонент (газ) \rightleftharpoons i -й компонент (жидкость). В пористых МК Q_i представляет собой константу прямой реакции, умноженную на относительное изменение площади контакта фаз газ–жидкость.

$$Q_i = \frac{\frac{D_{im}}{\delta K_{im}} \lambda_{igm}^+ \lambda_{iml}^+}{\frac{D_{im}}{\delta K_{im}} \lambda_{igm}^+ + \frac{D_{im}}{\delta K_{im}} \lambda_{iml}^+ + \lambda_{igm}^+ \lambda_{iml}^+} \quad (11)$$

Наиболее сложный случай – массоперенос через непористую мембрану (11).

Здесь $\frac{D_{im}}{\delta K_{im}}$ – проницаемость мембраны за счет диффузионного сопротивления,

λ_{igm}^+ – константа прямой реакции i -й компонент (газ) \rightleftharpoons i -й компонент (мембрана),

λ_{iml}^+ – константа прямой реакции i -й компонент (мембрана) \rightleftharpoons i -й компонент (жидкость).

Аналогичный уравнению (11) результат можно получить, рассчитывая суммарную проницаемость трех последовательных слоев с проницаемостями λ_{igm}^+ , $\frac{D_{im}}{\delta K_{im}}$, λ_{iml}^+ .

Следует отметить, что уравнения (10), (11) не требуют предположения равновесной сорбции на границах раздела фаз и описывают неравновесный массоперенос газ–жидкость.

Интересно отметить, что суммарная проницаемость по уравнению (11) в общем случае может быть выше, чем для пористых мембран, из-за различных констант скоростей сорбции. Таким образом, непористая мембрана может увеличивать массоперенос газ–жидкость. В большинстве предшествующих работ с МК предполагалось, что непористая мембрана может только снижать массоперенос.

Для получения суммарной проницаемости мембраны в МК разработана экспериментальная методика, включающая эксперименты по газопроницанию через трехслойную мембрану, включающую две полимерных мембраны и подвижный слой жидкости между ними, а также программные средства обработки экспериментальных данных, реализованные в среде Delphi 5.0.

Для решения системы уравнений массопереноса в МК разработаны несколько численных сеточных методов [2].

На рис. 2 показано распределение концентрации в жидкой фазе в случае постоянных парциальных давлений в газовой фазе, число Пекле равно 1 (12)

$$Pe_i = \frac{4V_{\max} b_i^2}{D_i l} \quad (12)$$

и безразмерная проницаемость равна 2 (13)

$$B_{iml} = \frac{Q_i}{\frac{D_i}{b_i K_i}} \quad (13)$$

Здесь V_{\max} – скорость жидкости в центре канала; K_i – константа Генри сорбции i -го компонента в жидкой фазе.

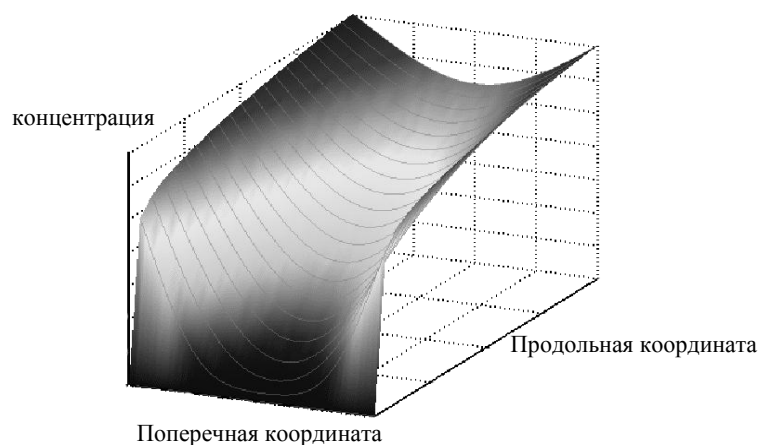


Рис. 2. Распределение концентрации в жидкой фазе в случае постоянных парциальных давлений в газовой фазе

Можно видеть, что на входе в МК наблюдается резкий концентрационный пограничный слой вблизи мембраны и в конце модуля постепенно выравнивается на горизонтальном уровне, равновесном к газовой фазе. Пограничный, продольный профиль концентрации не линейный из-за наличия сопротивления границы газ–жидкость. Если проницаемость границы раздела бесконечно большая, то этот профиль становится горизонтальным на уровне, равновесном к газовой фазе.

Как упоминалось ранее, биогаз – многокомпонентная газовая смесь. В представленных исследованиях предполагается, что другие компоненты биогаза, такие, как аммиак и сероводород, удалены с помощью химической адсорбции или с помощью других (дополнительных) мембранных газоразделительных систем.

Противоточные мембранные контакторы могут обеспечить задаваемое обогащение метана с высокой степенью его извлечения из биогаза. На рис. 3 показаны зависимости концентрации CO_2 в ретентате (рис. 3,а) и степени извлечения метана (рис. 3,б) от потока жидкости. Жидкий носитель – вода. Поток газа на входе 100 нл/ч. Кривые нарисованы для различных площадей мембраны. Если концентрация CO_2 в ретентате и площадь мембраны задана – поток жидкости можно определить из рис. 3,а (см. пунктир-

ные линии). Из рис. 3,б можно определить степень извлечения метана. Аналогичные вычисления были проведены для бародиффузионного мембранного модуля, работающего в вакуумном режиме. Похожие результаты могут быть получены при селективности мембраны более чем 10^2 .

Для реализации десорбции CO_2 из жидкой фазы с малым энергопотреблением необходимо включить в схему десорбер последовательно с абсорбером по жидкости и поддерживать существование движущей силы между абсорбером и десорбером, так как может возникать разница давлений между газовыми фазами. Основным недостатком продувки в десорбере является то, что компоненты сдувающего газа десорбируются в абсорбере и снижают очистку метана.

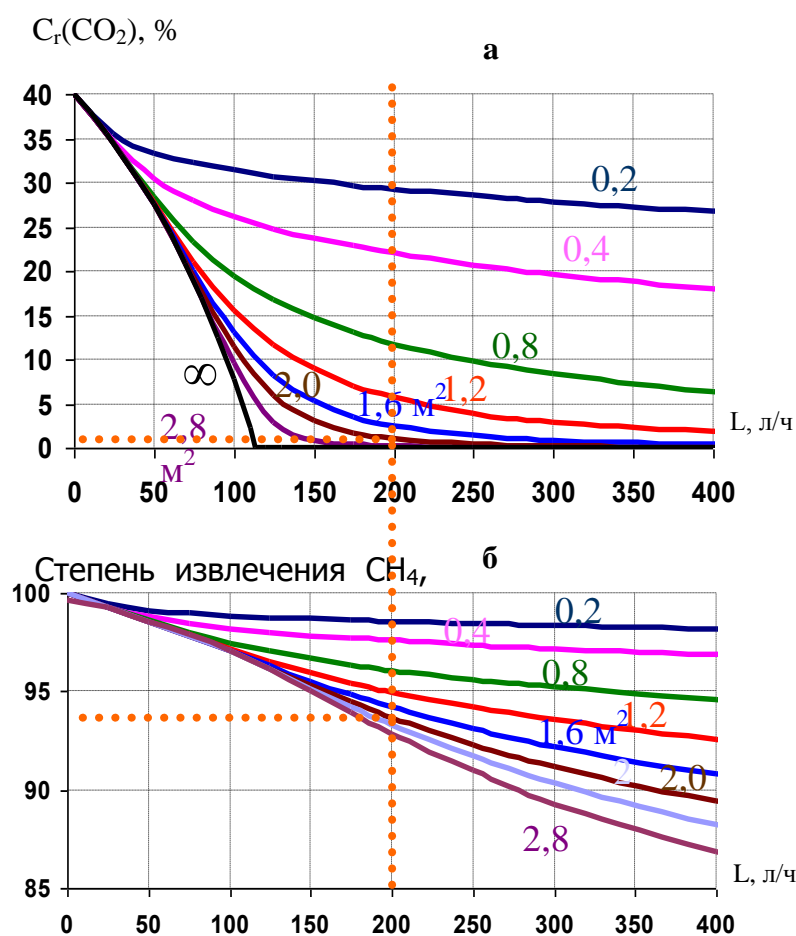


Рис. 3. Разделительные характеристики мембранного контактора:
 а – зависимость концентрации CO_2 в потоке ретената от потока жидкости,
 б – зависимость степени извлечения метана от потока жидкости

Техника эксперимента. Исследования показали, что для достижения высокой степени чистоты метана в абсорбере в случае вакуума в десорбере (рис. 4) необходимо достигнуть высокой степени насыщения жидкости в абсорбере и высокой степени очистки жидкости в десорбере. Оптимальным способом, которым можно это реализовать, является использование одинаковых противоточных МК в качестве абсорбера и десорбера с ограниченным потоком жидкости.

При проведении исследований применялся РМК для разделения модельного биогаза (40% CO_2 и 60% H_2) с использованием высокоэффективных противоточных плоскорамных МК, разработанных на базе непористой мембраны ПВТМС (рис. 5). В контакторах реализуется режим, близкий к идеальному параллельному противотоку, они имеют постоянный жидкостной зазор 100 мкм, обладают низким гидравлическим сопротивлением из-за относительно малой длины каналов.

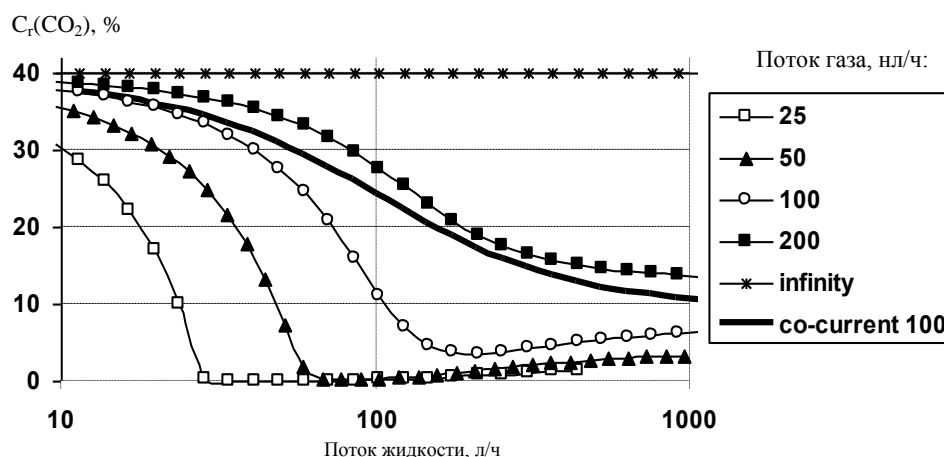


Рис. 4. Зависимость извлечения CO_2 из биогаза от потока жидкости в РМК при различных входных потоках газа $S_a=S_n=2 \text{ м}^2$, $b_{1a}=b_{10}=100 \text{ мкм}$

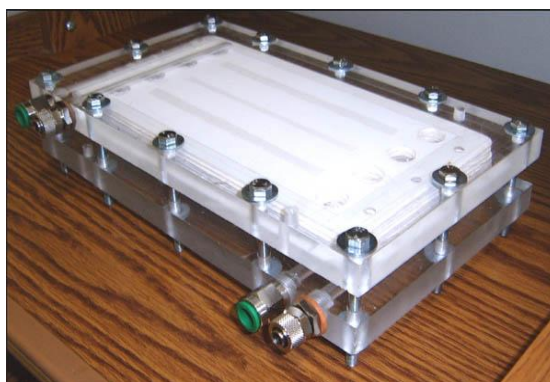


Рис. 5. Плоскорамный мембранный контактор

Результаты экспериментального исследования плоскорамных мембранных контакторов для удаления CO_2 представлены на рис. 6. Из представленных зависимостей видно довольно большие значения разделяемого потока газа по отношению к площади мембраны при заданных значениях очистки от CO_2 и отношении потоков газ/жидкость.

Результат вычисления РМК для одновременного извлечения CO_2 из биогаза и обогащения углекислым газом воздуха представлен на рис. 7. РМК работает в изотермическом режиме с водой в качестве жидкого абсорбента. Схема позволяет получить после осушки метан чистотой 94% со степенью извлечения более чем 90%. Десорбция CO_2 осуществляется продувкой воздухом. В результате получается воздух, обогащенный CO_2 до 4,6%. Такая газовая смесь может быть использована как дополнительное удобрение.

Газоразделительный блок позволяет получать газы в соответствии с промышленными требованиями. В частности, в качестве продукта может быть получено биотопливо с высокой концентрацией метана со степенью извлечения 90% и выше. Имеется три способа удаления CO_2 : получение технически чистого CO_2 в вакуумной схеме, в смеси с воздухом с концентрацией 3–5% и в виде раствора в жидком абсорбенте. Последние два способа перспективны для дополнительного удобрения растений.

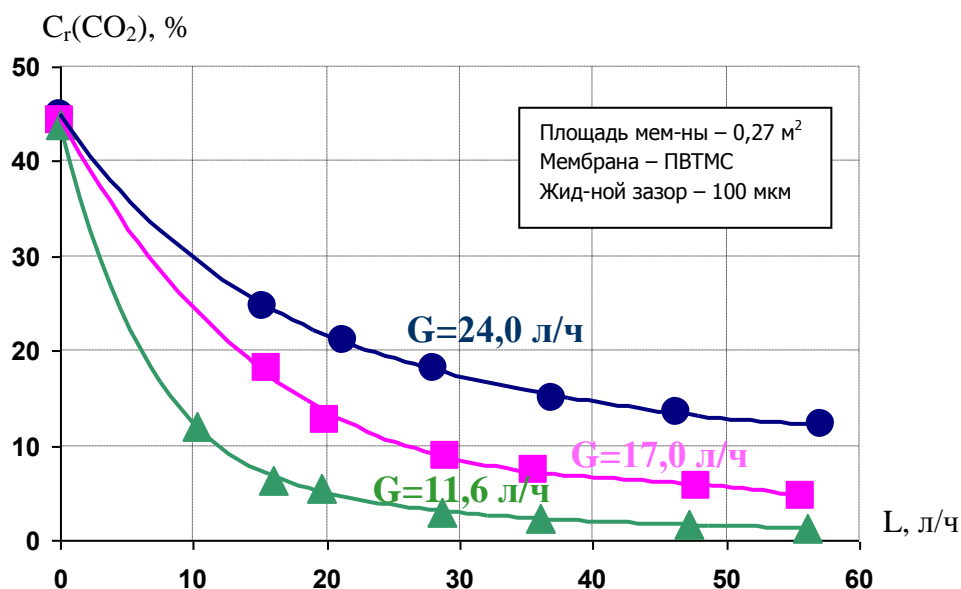


Рис. 6. Зависимость концентрации CO_2 при различном отношении потоков газ/жидкость

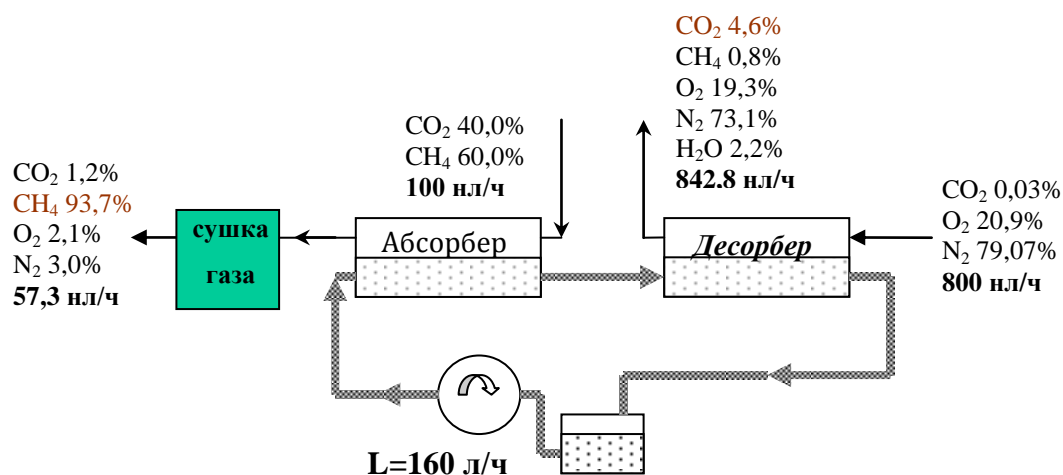


Рис. 7. РМК с низким энергопотреблением для извлечения CO_2 из биогаза. $P_{\text{газ абс}}=2$ атм; $P_{\text{газ дес}}=1$ атм; жидкостной зазор $b_l=100$ мкм; площадь мембран=2x2=4м²; мембрана – ПВТМС

Выводы. Показано, что оптимизация биогазовых технологий может дать существенный экологический и энергосберегающий эффект. Полученные результаты особо значимы в сферах жилищного строительства и коммунального обслуживания (экологически чистая переработка муниципальных отходов).

Проведенное анаэробное сбраживание помета кур в психрофильном режиме показало устойчивую и стабильную работу реакторов. При этом распад органического вещества по выходу биогаза достигал 30–35% при ежедневной загрузке на 500 литров емкости метантенка до 10–12 кг помета. Эксперименты в лабораторных условиях в диапазоне влажности от 15 до 95% при мезофильном режиме для птичьего помёта показали, что наиболее интенсивное газовыделение и достаточно высокая степень конверсии органического вещества в биогаз наблюдались при влажностях птичьего помета выше 75%. Максимальное количество биогаза было получено при влажности 95%.

Список литературы

1. Сидыганов, Ю. Н. Обеспечение режимов работы экспериментального газоразделительного комплекса / Ю. Н. Сидыганов, Д. Н. Шамшуров, Р. В. Яблонский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – №1.
2. Сидыганов, Ю. Н. Модель массопереноса многокомпонентной смеси в мембранных контакторах для оптимизации процесса газоразделения / Ю. Н. Сидыганов, А. Ю. Окунев, Д. Н. Шамшуров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – №12.

Статья поступила в редакцию 01.04.08

Yu. N. Sidyganov, D. I. Mukhortov, D. N. Shamshurov

WAYS OF USING BIOGAS TECHNOLOGIES IN THE FARMING SECTOR OF THE REPUBLIC OF MARI EL

Matters on processing of organic wastes of farming sector through anaerobic composting providing energy carriers (biogas) and qualitative fertilizers are presented. The techniques developed in the course of the research done are suggested to be used in the farming sector of the Mari El Republic.

СИДЫГАНОВ Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации машин и оборудования МарГТУ. Область научных интересов – вопросы биоэнергетики, совершенствования тепловых установок. Автор более 100 публикаций.

МУХОРТОВ Дмитрий Иванович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур. Область научных интересов – проблемы, связанные с использованием органических отходов в лесном хозяйстве. Автор 50 публикаций.

ШАМШУРОВ Дмитрий Николаевич – инженер кафедры эксплуатации машин и оборудования МарГТУ. Область научных интересов – проблемы биоэнергетики в агрокомплексе. Автор 11 публикаций.