

CZU: 662.76

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ БИОГАЗА****Виктор КОВАЛЕВ, Ольга КОВАЛЕВА\*, Владимир НЕННО***Молдавский государственный университет**\*Институт химии*

Рассмотрены новые комбинированные процессы и установки для очистки биогаза, увеличения содержания в нём биометана и улучшения энергетических характеристик для расширения его практического использования как возобновляемого источника энергии. Разработанная концепция основывается на гальванохимической технологии очистки газов от агрессивных сульфидных соединений и отделении биометана от примесных газов водно-абсорбционным способом. Очищенный биометан может применяться фермерскими хозяйствами в качестве топлива, а диоксид углерода – для культивирования микроводорослей.

**Ключевые слова:** *альтернативное топливо, биогаз, биометан, очистка биогаза, абсорбер, заправка автотранспорта.*

**ELABORATION OF BIOGAS PURIFICATION AND CONDITIONING PROCESSES**

New combined processes and equipment for biogas purification were proposed to enhance the biomethane contents and provide the improved energy indicators, to broaden its practical applications as a renewable energy source. On the basis of elaborated concept the following technologies are laid: galvano-chemical treatment of gases to isolate the aggressive sulfide compounds and biomethane separation from admixture gases by water absorption. Purified biomethane can be used as a motor fuel for farms, whereas carbon dioxide can be applied for microalgae cultivation.

**Keywords:** *alternative fuel, biogas, biomethane, biogas purification, absorber, refueling of motor transport.*

**ELABORAREA PROCESELOR DE EPURARE ȘI CONDIȚIONARE A BIOGAZULUI**

Sunt propuse procese și instalații noi combinate pentru purificarea biogazului, creșterea conținutului de biometan și îmbunătățirea indicilor energetice pentru extinderea utilizărilor practice ca sursă de energie regenerabilă. Conceptul elaborat se bazează pe tehnologia galvanochimică de purificare a gazelor de compoziții sulfurați agresivi și de separare a biometanului de gazele impurificatoare prin absorbție cu apă. Biometanul purificat poate fi folosit ca combustibil pentru transportul auto la ferme, iar bioxidul de carbon poate fi aplicat pentru cultivarea microalgelor.

**Cuvinte-cheie:** *combustibil alternativ, biogaz, biometan, purificarea biogazului, absorbant, alimentare cu combustibil.*

**Введение**

Ввиду с истощаемости природных источников углеводородного топлива, постоянно уменьшающихся запасов энергоносителей и их удорожания, развитие мировой экономики все более связывается с разработкой биохимических методов получения возобновляемой энергии, альтернативной природному газу. Это обусловлено и желанием многих стран достичь определённого уровня энергетической безопасности. На сегодняшний день наиболее развито производство и использование биогаза. Только в Германии имеется свыше 8000 крупных биогазовых установок, а в энергетическом балансе Дании биогаз составляет 18%. В ряде городов мира (Стокгольм, Женева и др.) курсирует городской транспорт с надписью «на биогазе». Однако Молдова, в силу социальных и экономических обстоятельств, – на последнем месте в Европе. Единственный положительный опыт в республике – это успешная организация работы биогазовой станции в хозяйстве Фырладень (руководитель – Унгуриану Тудор).

Одним из важных стимулирующих факторов развития биогазовой технологии является то обстоятельство, что биометан стоит в три раза дешевле бензина, а 1 м<sup>3</sup> биогаза приравнивается к 1 литру жидкого топлива. Есть несколько путей использования биогаза: для когенерации электрической и тепловой энергии, в двигателях внутреннего сгорания. Из 1 м<sup>3</sup> биогаза можно получить порядка 2,4 кВт·ч электроэнергии при его сжигании в когенерационной установке. Сама биогазовая система весьма экономна: от производимой энергии зимой она потребляет всего 10-15 %, а летом 3-7 % [1]. Производство биогаза позволяет предотвратить выбросы в атмосферу метана, которые сохраняются в атмосфере более 12 лет и оказывают влияние на парниковый эффект в 21 раз более сильное, чем CO<sub>2</sub>. Сокращение выбросов метана в атмосферу – лучший краткосрочный способ предотвращения глобального потепления. Одним из решений этой проблемы является биогазовая технология.

В реальных условиях, однако, при переработке биомассы методом анаэробного метаногенного брожения содержание метана как основного горючего компонента в биогазе не превышает 40-70%, а водорода – не более 1%. Остальное – балластные примеси: углекислый газ – 30-60%, сероводород – до 3%, монооксид углерода и другие газы 1-5%. Как правило, полученный биогаз используется для внутреннего потребления самим производителем путем его сжигания и получения тепловой и электрической энергии. Но даже в этом случае требуется удаление из биогаза диоксида углерода, паров воды и сероводорода – агрессивного газа, являющегося причиной кислотной коррозии оборудования и выбросов в атмосферу окислов серы.

Широкое применение в очистке биогаза получили: физическая абсорбция водой и растворами этаноламинов; хемосорбция и абсорбция водными растворами щелочей и карбонатов; адсорбция на оксидах алюминия и природных сорбентах и др.

Исследования эффективности очистки биогаза различными методами и разработка наиболее перспективных конструкций аппаратов для реализации этих процессов является актуальным и востребованным направлением [2-7]. Выгоднее не сжигать весь получаемый биогаз, ограничиваясь лишь своими нуждами потребления, а производить очистку его до биометана – полного аналога природного газа с концентрацией метана в пределах 95-99 %.

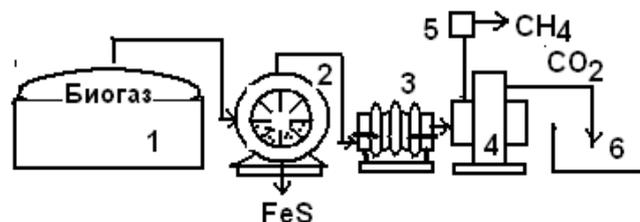
В дальнейшем биометан можно использовать как топливо в сжатом или сжиженном состоянии, или обеспечить условия для отвода его в городскую газовую сеть. В последние годы стало актуальным решение проблем заправки биогазом автотранспорта как более экологическим и дешевым видом топлива. Подобные проектные решения целесообразны для объектов с уже имеющейся инфраструктурой или в местах, где прокладка газопровода будет экономически выгодной. К таким объектам относятся городские очистные сооружения, свалки твердых бытовых отходов (ТБО), предприятия пищевой промышленности в черте города, сельскохозяйственные предприятия и объекты, обладающие воспроизводимой растительной и животноводческой сырьевой базой.

Расширение областей практического применения биогаза предъявляет более высокие требования к его чистоте и качеству выделяемого биометана. Биогаз необходимо очищать от разнородных газовых примесей с различными характеристиками и концентрациями. Такую очистку трудно унифицировать, поэтому решение ряда проблем становится возможным на основе комбинированных технологий и их оптимизации.

Вместе с тем, на качественные характеристики исходного биогаза большое влияние оказывает ряд факторов, таких как состав биомассы и ее ферментационные свойства, конструкция биореакторов, эксплуатационная грамотность, культура производства и т.д. Достижения последних лет по интенсификации биогазовых технологий с применением нового типа фитокатализаторов, согласно нашим разработкам в области «зеленой энергетики», придали новый импульс применению этих процессов.

### Технология очистки биогаза от сульфидов

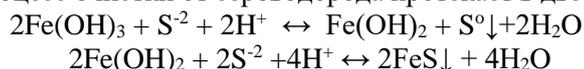
Нами разработана технологическая схема комбинированного процесса получения биометана в соответствии с требованиями качества природного газа с улучшенными энергетическими характеристиками (рис.1). Предложенный подход сочетает гальванохимический и водно-адсорбционный методы.



**Рис.1.** Схема комбинированной технологии очистки и кондиционирования биометана: 1 – газгольдер; 2 – установка гальванохимической газоочистки от серосодержащих соединений; 3 – компрессор высокого давления; 4 – установка водно-адсорбционного разделения  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ ; 5 – установка осушки биометана; 6 – бассейн утилизации  $\text{CO}_2$  для культивирования микроводорослей.

Другой способ очистки биогаза от сероводорода состоит в пропускании газа через слой  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . В качестве загрузки реактора используется металлическая стальная стружка в смеси с коксом в весовом соотношении (3-5) : 1, помещаемая в 0,5-1%-ный раствор  $\text{NaCl}$ . Барботирование биогаза происходит при периодическом перемешивании загрузки благодаря вращению реактора. В основе этого принципа лежит безреагентная гальванохимическая технология, основанная на использовании эффекта короткозамкнутых гальванических элементов из смеси токопроводящих материалов – железных стружечных отходов и кокса, имеющих разные значения электрохимических потенциалов. В процессе перемешивания в барабанном устройстве в присутствии кислорода образуется множество гальванопар без наложения тока от внешних источников. При замыкании цепи на поверхности кокса протекает преимущественно катодная реакция, а на поверхности железа – анодная.

Первичной в этом процессе является реакция восстановления кислорода в интервале pH 6-10:  $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e} = 4\text{OH}^-$ , являющаяся основной редокс-реакцией на поверхности кокса, равновесный потенциал которой характеризуется уравнением  $E = 1,23 - 0,059\text{pH}$ . На поверхности железной стружки железо корродирует вследствие протекания анодной реакции окисления металлического железа до ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  по реакциям:  $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ , и  $\text{Fe} = \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}$ . Затем происходит связывание образующихся ионов железа (II) и (III) вследствие их гидролиза:  $\text{Fe}^{2+} + 2\text{HON} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+$ , со значениями потенциалов  $E = -0,26 - 0,06\text{pH}$  и, соответственно,  $\text{Fe}^{3+} + 3\text{HON} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}^+$ ,  $E = -0,15 - 0,06\text{pH}$ . Таким образом, благодаря разности потенциалов гальванопары железо-кокс, составляющей порядка 1 В, формируются гидроксиды железа, которые после этого взаимодействуют с  $\text{H}_2\text{S}$  и  $\text{S}^{2-}$  с образованием сульфидов. Процесс очистки от сероводорода протекает в две стадии согласно следующим уравнениям:



Суммарно:  $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{S} = 2\text{FeS} + \text{S}^0 + 6\text{H}_2\text{O}$ ; или с учетом зарядов:  $\text{Fe}^{+3} + \text{e} \rightarrow \text{Fe}^{+2}$  и  $\text{S}^{2-} - 2\text{e} \rightarrow \text{S}^0$ .

В результате выпадает осадок черного цвета, соответствующий брутто-формуле  $(2\text{FeS} \cdot \text{S}^0)$  или  $\text{Fe}_2\text{S}_3$ [8].

Предложенный гальванохимический реактор включает корпус 1 с герметичным окном 2, коническим основанием 3, патрубками ввода биогаза 4 с барботером 5 и его вывода 6 и вспомогательную емкость 10. В патрубке ввода 7 раствора  $\text{NaCl}$  установлен уровнемер 8 с поплавковым устройством 9. Хлорид-ионы в этом процессе являются активаторами поверхности анодно растворяющегося железа. Внутри корпуса 1 размещен вращающийся перфорированный барабан 11 с боковым отверстием 12, внутренними полками 13 и загрузкой 14. Барабан соединен с помощью оси 15 через сальниковое устройство 16 с электроприводом 17, подключенным к командоаппарату 18. Внутри конического основания 3, имеющего бункер с задвижками 19 и 20, размещены наклонные полки 21.

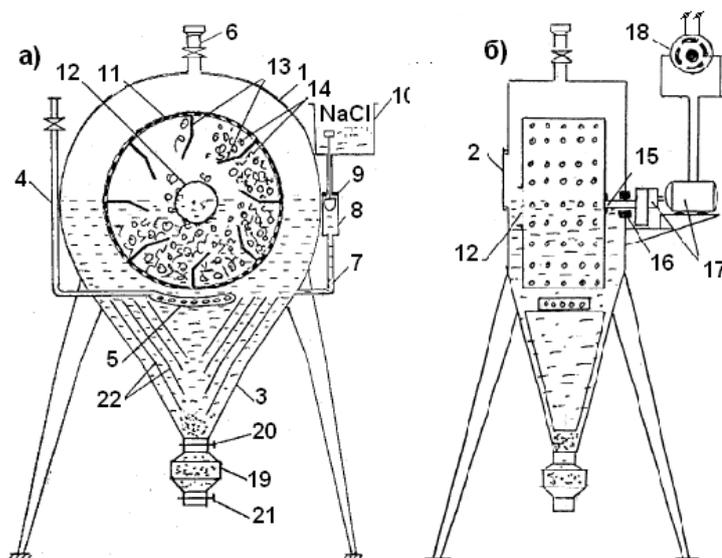


Рис. 2. Схема устройства для гальванохимической глубокой очистки биогаза от серосодержащих соединений: а) общий вид; б) боковой разрез.

По мере накопления достаточного количества ионов железа или его гидроксидов в растворе, через трубопровод 4 производится подача биогаза на барботер 5. Биогаз диспергируется в виде мелких пузырьков в водном растворе, и содержащийся в нем сероводород реагирует с ионами железа с образованием осадка сульфидов. Частицы осадка за счет седиментации выносятся из внутреннего объема барабана в нижнюю коническую зону 3, снабженную наклонными полками 21. Полки выполняют функции тонкослойного отстойника. Образующийся плотный осадок при открытой задвижке 20 и закрытой задвижке 21 выносятся в бункер 19. По мере накопления осадка производится закрытие задвижки 20 и открытие задвижки 21, затем цикл повторяется.

Кокс в устройстве расходуется только за счет уноса при трении, а железная стружка является расходным компонентом вследствие гальванохимического растворения. По мере истощения стружки, её периодически подсыпают через отверстие 12. Уровень раствора NaCl в корпусе находится в пределах половины высоты вращающегося барабана, а скорость вращения внутреннего барабана составляет 3-5 оборотов в минуту.

Биогаз, освобожденный от соединений серы, непрерывно отводится через патрубок 6 для использования в процессах каталитического сжигания в теплоэнергетических установках или в когенераторах для производства электрической и тепловой энергии.

Высокодисперсные осадки сульфидов железа, образующиеся в гальванохимических процессах очистки биогаза от соединений серы, по мере их накопления, после промывки и высушивания, могут быть утилизированы в качестве пигментов черного цвета для лакокрасочных материалов.

#### Водно-абсорбционная технология очистки биогаза от оксидов углерода

В основу абсорбционной технологии очистки газов положены различия в растворимости газов: метана, сероводорода, моно- и диоксида углерода, при различном давлении и температуре. Растворимость  $\text{CO}_2$  в воде значительно выше, чем остальных газовых компонентов в составе биогаза, и он частично карбонизируется с образованием ионов  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . С повышением парциального давления растворимость двуоксида углерода в воде быстро увеличивается, а с повышением температуры – снижается (табл.1).

Таблица 1

Растворимость  $\text{CO}_2$  в воде [8]

Давление $\text{CO}_2$ , атм	1	10	20	30
Растворимость $\text{CO}_2$ в воде при $10^\circ\text{C}$ , $\text{cm}^3/\text{л}$	1194	10320	18300	24850

В то же время растворимость метана в воде небольшая, в объемном соотношении (3-4):100, он практически не взаимодействует с водой. Растворимость монооксида углерода (CO) составляет 0,0026 г/100 мл. Различия в растворимости этих газов в воде позволили предложить водно-абсорбционную технологию на второй стадии газоочистки. Этот метод достаточно эффективен для разделения газовых смесей.

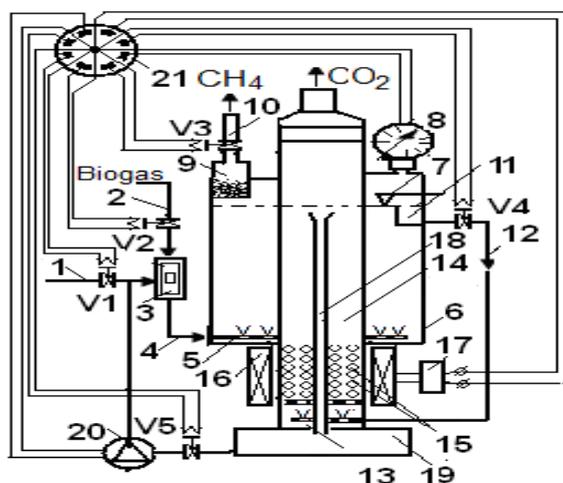


Рис.3. Схема водно-абсорбционного сепарирующего устройства для отделения биометана от оксидов углерода [9]. Обозначения – по тексту.

Устройство (рис.3) включает трубопровод 1 ввода исходной воды и трубопровод 2 биогаза, сатуратор 3, патрубок 4 ввода водно-газовой смеси, барботер 5, герметичный абсорбционный сепаратор 6 и уровнемер 7, электромагнитный манометр 8, цеолитовый фильтр 9 с патрубком 10 вывода биометана. Сливной лоток 11 соединен с трубопроводом 12, содержащим электромагнитный вентиль V4 и барботер 13, установленный в десорбере 14 открытого типа. Внутри десорбера размещена магнитная сферическая загрузка 15, а с внешней стороны установлен соленоид 16, соединенный с регулятором напряжения 17. Центральная отводящая труба 18 соединена с рециркуляционной емкостью 19 и рециркуляционным насосом 20. Командоаппарат 21 коммутационно соединен с вентилями V1-V5, манометром 8, регулятором напряжения 17 и рециркуляционным насосом 20.

Устройство работает следующим образом. В сатуратор 3 при закрытых вентилях V1 и V2 по трубопроводу 1 подается исходная вода, а по трубопроводу 2 – биогаз из газгольдера биогазового реактора: образуется газо-жидкостная смесь. Смесь отводится через трубопровод 4 в барботер 5 и в герметизированный абсорбер 6, в котором поднимают давление до 10-15 атм, фиксируемое манометром 7. Объем абсорбера заполняется до уровня, отмечаемого уровнемером 7. При этом  $\text{CO}_2$ , а также примесной  $\text{H}_2\text{S}$ , содержащиеся в составе биогаза, абсорбируются в воде. Растворимость их в воде существенно возрастает при повышенном давлении, а  $\text{CH}_4$ , ввиду практической нерастворимости его в этих условиях, скапливается в верхней надводной зоне абсорбера 6 и отводится через цеолитовый фильтр 9 на утилизацию.

Цеолит – минерал из группы алюмосиликатов натрия и кальция. Заключенная в нем вода подвижна, легко удаляется при нагревании и вновь поглощается без изменения однородности и прозрачности кристаллов. Для целей фильтрования также может быть использован искусственный алюмосиликат («пермутит»), который можно получить из каолина либо нефелина и других видов сырья нагреванием их с содой при высокой температуре.

По мере достижения заданного уровня жидкости в абсорбере 6, от командоаппарата подается команда на открытие регулируемого вентиля V4 и подачу напряжения на регулятор 17 тока и соленоид 16. Вследствие этого вода, обогащенная растворенными в ней  $\text{CO}_2$  и небольшим количеством  $\text{H}_2\text{S}$ , движущаяся под избыточным давлением по трубопроводу 9 через барботер 13, заполняет объем десорбера, в котором давление сбрасывается до нормального.

Нижняя часть десорбера 14 заполняется сферической магнитной загрузкой 15, изготовленной из спеченного гексаферрита бария, намагниченного до насыщения. Переменный ток подается от регулятора напряжения 17 на соленоид 16, что обеспечивает возникновение электромагнитного поля. Процесс образования взвешенного слоя магнитных сферических частиц 15 протекает за счет их интенсивного поступательно-вращательного движения и хаотического соударения. Такое движение частиц в переменном электромагнитном поле формирует магнитооживленный слой и связано с наличием ориентационного порядка в расположении диполей, приводящего к диполь-дипольному взаимодействию частиц, к их лобовым столкновениям и рассеиванию.

В результате возникновения эффекта магнитооживления происходят локальные гидравлические удары и образование зон с повышенным и пониженным давлением, благодаря чему возникает турбулизация обрабатываемой воды, что интенсифицирует её дегазацию.

Наряду с этим, налагаемое переменное электромагнитное поле воздействует на полярные ионы  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , а также на сульфид-ионы, что приводит к разрыву межатомных связей. Это способствует их восстановлению до свободных молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  и дополнительному образованию газовых пузырьков. Кроме того, за счет переориентации внешнего вектора и индукции на обратные величины, переменное электромагнитное поле облегчает разрыв связей в карбонат-ионах  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ , а также устраняет коалесценцию газовых пузырьков, поддерживая структуру псевдооживленного слоя однородной. Это способствует интенсификации процесса декарбонизации и выделению газообразных продуктов из воды.

Величина индукции 0,1-0,2 Тесла оптимальна для процесса дегазации. Размер магнитотвердых сферических гранул – от 4 до 12 мм. Для формирования магнитооживленного слоя необходимы остаточная индукция частиц более 0,05 Тесла, коэрцитивная сила частиц  $H_c > 900$  Эрстед, частотный диапазон 10-200 Гц при изменении размера частиц от 1 до 20 мм.

В качестве материалов для магнитооживления пригодны гексаферрит бария или другие металл-ферритные соединения, обладающие постоянством магнитных свойств в переменных электромагнитных полях с индукцией до 0,1 Тесла. Высота неподвижного слоя насадки составляет 10-15 см.

Обработанная и дегазованная вода по центральному трубопроводу 14 стекает в нижнюю емкость 15. В этих условиях происходит частичное образование гидрокарбонатов и карбонатов по реакциям:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ . При магнитоожигении происходит их разрушение и выделение свободного  $\text{CO}_2$ . Выделяющийся при этом углекислый газ направляется в бассейн для развития микроводорослей.

#### Утилизация углекислого газа, отделяемого из биогаза, для культивирования микроводорослей

В процессах выращивания микроводорослей используется фундаментальное свойство фотосинтезирующих клеток — способность фиксировать  $\text{CO}_2$  из атмосферы и преобразовывать его в разнообразные вещества (биомассу) с выделением в атмосферу кислорода. То же самое делают и растения, но микроводоросли растут гораздо быстрее. Кроме того, они не претендуют на сельскохозяйственные площади, занятые пищевыми сортами растений.

В биогазовой технологии углекислый газ является технологическим отходом, поэтому может служить эффективным средством для культивирования микроводорослей, обладающих множеством полезных свойств [10, 11]. В условиях фотосинтеза микроводорослей типа спирулина "*Spirulina platensis*", и/или ряска "*Lemna*", и/или "*Chlorella pyrenoidosa*", содержание белка в них ходит до 70%, что делает их ценной кормовой добавкой для животных.

Для реализации этой технологии, включающей культивирование микроводорослей, питательной средой для которых является  $\text{CO}_2$ , предложена конструкция установки (рис.4). Она может выполняться с наружной теплоизоляцией, либо эксплуатироваться в утепленном помещении и дополнительно обогреваться благодаря теплообменникам. При этом микрофлора освещается экономичными светодиодными лампами, со световым потоком в красном и синем диапазоне волн, который является оптимальным для развития микроводорослей [12]. Благодаря этому, процесс роста микроводорослей может протекать и в ночное время, что повышает продуктивность получения зеленой биомассы.

Эффективность культивирования микроводорослей обеспечивается непрерывным вводом растворенного углекислого газа для их жизнеобеспечения и развития, создания условий повышенного массообмена, возможностью дозирования удобрительных смесей. Абсорбентом углекислого газа является рециркулирующая в установке вода, в которой его растворимость при нормальной температуре составляет 1174 мл/л. При этом 1 кг массы растущих микроводорослей генерирует 2 кг газообразного кислорода ( $\text{O}_2$ ), выделяющегося в атмосферу.

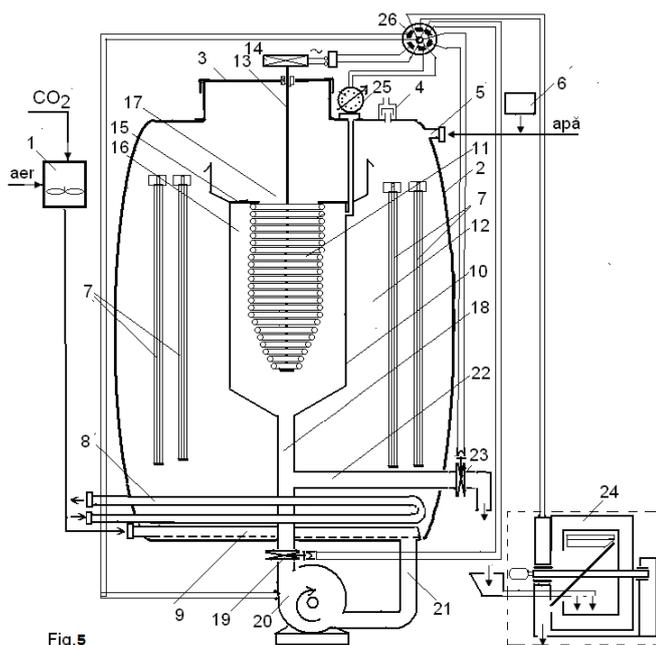


Fig.5

Рис.4. Схема установки для выращивания микроводорослей (обозначения – по тексту).

Установка включает компрессор 1 газовой смеси, бассейн 2 с монтажно-смотровым люком 3, гидрозатвор 4 с патрубком 5 ввода воды, вспомогательную емкость 6 с питательной средой, блоки светодиодных ламп 7, теплообменник 8, барботер 9, внутренний цилиндрический корпус 10 с пружинно-щелевым фильтром 11 с основанием 12. Основание соединено со штоком 13 и электромагнитным вибратором 14. Другими компонентами установки являются опорное дисковое основание 15, зона фильтрации 16, надфильтровое пространство 17, трубопровод 18 с электромагнитным клапаном 19 и насосом 20 с байпасом 21, трубопровод 22 с электромагнитным клапаном 23, блок 24 самоочищающейся центрифуги, электроконтактный датчик 25 гидравлического давления и командоаппарат 26.

Через патрубок 5 вводится до определенного объема исходная вода и культура микроводорослей, и из вспомогательной емкости 6 дозируется заданное количество микроудобрений, например – мочевины. Затем включают компрессор 1 и барботер 9 подают газоздушную смесь, насыщенную углекислым газом. Одновременно с этим включается теплообменник 8 для обеспечения оптимальной температуры в корпусе цистерны 31-33°C, а также светодиодные лампы 7 с низким электропотреблением. Этим обеспечивается быстрый рост микроводорослей с ежесуточной продуктивностью культуры до 8 г в пересчете на сухую биомассу на 1 л среды. Углекислый газ из газоздушной среды, подаваемой на барботер 9, растворяется в воде, ускоряя рост микроводорослей, а избыток воздуха отводится через гидрозатвор 4.

При этом микроводоросли распределяются практически равномерно в водной среде, образуя низкоконцентрированную суспензию, требующую сгущения и обезвоживания биомассы для получения корма для животных в концентрированном виде.

Наличие встроенного механического пружинно-щелевого фильтра в водной микроводорослевой среде обеспечивает возможность непрерывного либо периодического удаления выращиваемых микроводорослей путем их сгущения и обезвоживания. Такая конструкция отличается простотой исполнения и эффективностью процесса фильтрации, обладает повышенной емкостью концентрата и продолжительностью фильтроцикла. Процесс регенерации такого фильтрующего устройства обеспечивается простым растягиванием пружин и увеличением при этом зазора между проволоочными рядами, что приводит к псевдооживлению и вымыванию сконцентрированных микроводорослей при обратном залповом потоке осветленных вод из надфильтрового пространства. Это снижает общий расход воды на собственные нужды при промывке и регенерации фильтра и обеспечивает возможность управления этим процессом в автоматическом режиме.

По мере достижения заданной концентрации биомассы, производится ее сгущение и обезвоживание, для чего с помощью командоаппарата 26 открывается электромагнитный клапан 19 и включается насос 20. Суспензия через байпас 21 перекачивается в корпус 11 пружинно-щелевого фильтра 11, где водный раствор в чистом виде просачивается через зазоры между витками проволоки внутрь фильтра, заполняя надфильтровое пространство 17, и затем вновь перетекает в рабочий объем корпуса цилиндра 2. При этом микроводоросли сгущаются в зоне фильтрации 16 до определенной плотности слоя. Вследствие этого проницаемость воды через зазоры между пружинами фильтра 11 снижается, и давление в зоне фильтрации 16 повышается, достигая заданного значения, регистрируемого электроконтактным датчиком 25.

В этот период от датчика 25 сигнал подается на командоаппарат 26, который отключает работу насоса 20, закрывает клапан 19, включает электромагнитный вибратор 14 и одновременно с этим открывает клапан 23 и включает работу самоочищающейся центрифуги. Вследствие этого вода из надфильтрового пространства 17 быстрым потоком устремляется в пространство 16, смывая слой микроводорослей с наружной стороны пружин фильтра 11 и отводя их на центрифугу 24 для обезвоживания.

В качестве центрифуги может быть применена стандартная горизонтальная конструкция с ножевым устройством для непрерывного автоматического удаления осадка.

По мере удаления из зоны фильтрации 16 микроводорослей давление в этой зоне снижается, вследствие чего подается сигнал на командоаппарат 26, который путем открытия-закрытия клапанов возобновляет фильтроцикл. При этом промежуток времени включения фильтроцикла может регулироваться в зависимости от скорости наращивания биомассы, устанавливаемой опытным путем.

Таким образом обеспечивается возможность круглогодичной эксплуатации установки, повышения эффективности процесса культивирования микроводорослей и обеспечения утилизации за счет выделения их в пастообразном и/или в обезвоженном виде.

**Выводы:**

1. Обоснована комплексная технология и разработаны установки для эффективной очистки и кондиционирования биогаза, образующегося в метаногенных процессах сбраживания биомассы. Их эффективность основана на малозатратных безреагентных методах селективного отделения балластных газов (агрессивного сероводорода), с использованием методов гальванохимической технологии, и остальных газов – посредством водно-абсорбционной и физико-химической технологии.

2. Показана эффективность предложенной комбинированной технологии, позволяющей обеспечить газоочистку с получением биометана до 96-98% повышенной чистоты и калорийности около 8000 ккал/Дж, приближенных к качеству природного газа.

3. Учитывая характеристики получаемого биометана после его селективной очистки от балластных газов, можно рекомендовать применение его в качестве моторного топлива для фермерских хозяйств.

4. Показана возможность утилизации выделяемого в процессе очистки углекислого газа для культивации микроводорослей и создания замкнутой экологически более чистой технологии газоочистки с использованием вторичных отходов и снижением выбросов парниковых газов.

**Библиография:**

1. ECOENERGY. Новости альтернативной энергетики. *Технология производства биогаза*. [Электронный ресурс] <http://ecoenergy.org.ua/biotoplivo/tehnologiya-proizvodstva-biogaza.html> – Дата поступления 16.03.2012.
2. КОВАЛЕВ, В., ДУКА, Г., КОВАЛЕВА, О. «ЗЕЛЕНАЯ ЭНЕРГИЯ»: инновационные экобиотехнологии и комбинированные реакторы. *Антология изобретений*. Кишинэу, СЕР USM, 2017. 504 с. ISBN 978-9975-71-902-5.
3. КОВАЛЕВ, В., КОВАЛЕВА, О., НЕННО, В. Повышение энергетических характеристик биогаза: *Часть 1. Технологический факторы, влияющие на процессы метаногенеза. Часть 2. Технологические аспекты управления процессом метаногенеза*. В: «Intellectus», 2019, №1 (в печати).
4. USM. *Procedeu și instalație pentru purificarea biogazului de hidrogen sulfurat*. Brevet MD Nr. 2767. Inventatori: COVALIOV, V., UNGUREANU, D., COVALIOVA, O., DUCA, Gh. Publ. BOPI, 7/2005.
5. CEANTURIA, V., SOLOJENKIN, P., KRAUSZ, S. *Bazele teoretice și practica epurării galvanochimice a apelor reziduale*. Ed. Universitatii, Petroșani (Rom), 2004, p.217. ISBN 973-8260-51-5.
6. USM. *Procedeu și instalație pentru purificarea biogazului de hidrogen sulfurat*. Brevet MD Nr. 3928. Inventatori: COVALIOV, V., COVALIOVA, O., NENNO, V., UNGUREANU, D. Publ. MD BOPI 6/2009.
7. USM. *Gazometru umed de capacitate variabilă*. Brevet MD Nr. 171Y, Inventatori: COVALIOV, V., UNGUREANU, D., COVALIOVA, O., SLIUSARENCO, V., Publ. BOPI, 3/2010.
8. ПЕМИ Г. *Курс неорганической химии*. 1963, т.1.
9. USM. *Instalație pentru purificarea biogazului*. Brevet MD Nr. 4459. Inventatori: COVALIOV, V., COVALIOVA, O., UNGUREANU, D., NENNO, V., Publ. BOPI, 1/2017.
10. USM. *Instalație combinată pentru extragerea selectivă a CO<sub>2</sub> din biogaz și creșterea microalgelor*. Brevet MD Nr. 4418. Inventatori: COVALIOV, V., COVALIOVA, O., TIMOFTE, N., MORARI, Iu., Publ. BOPI, 5/2016.
11. USM. *Instalație de epurare a biogazului cu regenerarea dioxidului de carbon*. Brevet MD Nr. 67Y. Inventatori: COVALIOVA, O., COVALIOV, V., UNGUREANU, D., DUCA, Gh., NENNO, V., Publ. BOPI, 8/2009.
12. USM. *Instalație pentru cultivarea microalgelor*. Brevet MD Nr.4372. Inventatori: COVALIOV, V., MORARI, Iu., COVALIOVA, O., SLIUSARENCO, V., NENNO, V., BOBEICĂ, V., Publ. BOPI, 9/2015.

*Примечание: Работа выполнена в рамках Институционального проекта 15.817.02.35A.*

**Информация об авторах:**

**Виктор КОВАЛЕВ**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник, Молдавский государственный университет, Институт исследований и инноваций.

**E-mail:** victorcovaliov7@gmail.com

**Ольга КОВАЛЕВА**, доктор habilitat химических наук, ведущий научный сотрудник, Институт химии, Молдова.

**E-mail:** olga196cov@yahoo.com

**Владимир НЕННО**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Молдавский государственный университет, Институт исследований и инноваций.

**E-mail:** nenno49@mail.ru

*Prezentat la 09.04.2019*