

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБРАЖИВАНИЯ ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТАНОГЕНЕРИРУЮЩЕЙ МИКРОБНОЙ АССОЦИАЦИИ

А.Ю. ВИНАРОВ, Д.П. СОКОЛОВ, В.Н. СМИРНОВ, З.Н. РОБЫШЕВА

Известно, что с экологической точки зрения животноводческие и птицеводческие комплексы, загрязняя почву, воду, воздух, представляют для окружающей среды даже большую опасность, чем крупные промышленные предприятия. Получение различных видов биотоплива из разнообразных органических отходов позволяет решать как экологические задачи, так и энергетические проблемы на уровне региональных нужд с одновременным созданием безотходных агропромышленных схем. Значительное число промышленных установок для метанового брожения сосредоточены в странах Африки, Латинской Америки, Азии и Ближнего Востока. Большой интерес к получению биогаза из различных органических отходов проявляют также страны Западной Европы — Германия, Франция. Нами рассмотрен метод интенсификации непрерывного процесса получения биогаза за счет замещения исходной естественной микрофлоры навозного стока более эффективным микробным консорциумом метаногенерирующих бактерий. В основу примеров положены результаты экспериментов по сбраживанию навоза в термофильных условиях. Предложенный подход позволил рекомендовать для практического применения оптимизированную технологическую схему соединения метантенков, обеспечивающую ускорение процесса сбраживания и повышение выхода биогаза при переработке навозных стоков с использованием консорциума микроорганизмов (*Methanobacterium omelianskii*, *Methanococcus mazei*, *Corynebacterium* sp., *Pseudomonas* sp. и *Arthrobacter simplex*).

Ключевые слова: экология, навозный сток, анаэробное сбраживание, биотопливо, биогаз, естественная микрофлора навоза, консорциум микроорганизмов, оптимизация режима, замещение культуры микроорганизмов, метантенки, оптимальная схема сбраживания.

Методы промышленной биотехнологии все шире внедряются в хозяйственную деятельность. При этом используемые микробиологические процессы направлены как на получение ценных биопродуктов, так и на биоутилизацию различных отходов для решения актуальных экологических задач (1). Известно, что с экологической точки зрения животноводческие и птицеводческие комплексы представляют для окружающей среды даже большую опасность, чем крупные промышленные предприятия. При этом крайне важными остаются две взаимосвязанные проблемы. С одной стороны, жидкие навозные стоки, попадая в почву и водоемы, создают серьезную экологическую опасность. Вследствие высокого содержания в них органических и минеральных веществ полное биоразложение таких стоков невозможно и, как следствие, происходит загрязнение близлежащих водоемов, отравление рыбы и нарушение биологического равновесия в целом (2). Одновременно загрязняется атмосфера — как за счет вредных веществ, выделяемых непосредственно на животноводческих комплексах, распространения неприятного запаха, так и в результате разложения навозных стоков на почве с образованием сероводорода, меркаптанов, альдегидов. С другой стороны, эти стоки — богатое органическое сырье, следовательно, их целесообразно использовать, причем с наибольшей экономической эффективностью и для получения продукта, пользующегося спросом.

С технической и экономической точки зрения выбор той или иной технологии утилизации навоза и помета во многом определяется его видом и влажностью. Широко распространены различные способы получения удобрений, компостов из навоза, в том числе на основе прогрессивной биотехнологии аэробной переработки навозных стоков в биоорганические удобрения (3, 4). Подстилочный помет, имеющий влажность до 50 %,

наиболее рационально высушивать, а также использовать для приготовления биокомпостов и топливных брикетов. Навоз плотной консистенции (влажность до 76 %) подходит для различного компостирования и частично для ферментативной, термической и другой сушки в смеси с сухим наполнителем. Полужидкий и жидкий сток (влажность до 96 %) эффективно использовать при выработке биогаза.

Проблема получения различных видов биотоплива из растительного сырья и разнообразных органических отходов достаточно актуальна и позволяет решать как экологические задачи, так и энергетические проблемы на уровне региональных нужд с одновременным созданием безотходных агропромышленных схем (5-7). В этой связи также актуальным для агрокомплексов можно считать разработку интенсивной биотехнологии получения биогаза из животноводческих отходов. Метаново-анаэробное сбраживание навозных стоков служит эффективным средством защиты окружающей среды от загрязнения и способом получения эффективного биотоплива — биогаза. Изучению теории метанового сбраживания различных видов сырья посвящен ряд теоретических работ (8-10).

Значительное число промышленных установок для метанового брожения сосредоточены в странах Африки, Латинской Америки, Азии и Ближнего Востока. Большой интерес к получению биогаза из различных органических отходов проявляют также страны Западной Европы — Германия, Франция. Из 1 кг сухого вещества органического сырья можно получить около 0,45 м³ биогаза (0,23 м³ метана). При этом ферма, на которой содержится 30 гол. крупного рогатого скота или 500 свиней, в состоянии полностью обеспечивать себя энергией (11). Получаемый при брожении биогаз имеет в среднем теплоту сгорания 5340-6230 ккал/м³, то есть 1 м³ биогаза эквивалентен 0,7 л мазута. Количество электроэнергии, вырабатываемой из 1 м³ биогаза, может составить около 2 кВт·ч.

Следует отметить, что эффективность работы метантенков зависит не только от технологии и используемых микроорганизмов, но также во многом определяется конструктивными особенностями аппарата и поддержанием оптимальных параметров процесса ферментации (12, 13).

Процесс метанового брожения может быть представлен в виде ряда основных фаз. Сначала высокомолекулярные органические соединения (полисахара, протеины и жиры) в результате ферментативного гидролиза переводятся в растворимые высокомолекулярные органические оксисоединения или соли, далее идет их сбраживание (гидролитическое расщепление) с образованием низкомолекулярных органических оксисоединений. Затем происходит синтез летучих органических кислот, а также газов — водорода, сероводорода, аммиака. После этого низкомолекулярные органические оксисоединения расщепляются до метана и углекислого газа. Биохимические изменения при метановом брожении — это следствие жизнедеятельности различных по физиологическим свойствам групп анаэробных бактерий.

Примерно 80 % органических веществ субстрата при метановом брожении превращаются в метан и углекислый газ. Качественный состав газов в значительной степени зависит от состава сбраживаемых сред. Получаемый в процессе сбраживания навозных стоков и различных растительных отходов биогаз содержит, как правило, от 56 до 70 % метана, 25-40 % углекислого газа, до 3 % сероводорода и следы водорода (9, 14).

Большая часть производственных исследований была выполнена для мезофильного режима и лишь немногие — для термофильного режима сбраживания. Имеются данные (15), что оптимальная температура, при

которой жизнедеятельность бактерий протекает более активно, для мезофильного процесса составляет 34-36 °С, для термофильного — 52-54 °С. Хотя термофильный режим обуславливает увеличение скорости распада органического вещества и повышение выхода биогаза, он требует больших теплотрат на поддержание температуры в метантенке.

Сбраживаемое органическое сырье обычно засевают ацетогенными и метаногенными бактериями. В частности, может использоваться ассоциация микроорганизмов, в которую входят сапрофитные анаэробные бактерии, сбраживающие углеводы, аммонифицирующие бактерии (*Clostridium*, *Bacillus*), ацетогенные бактерии (*Syntrophobacter*, *Desulfovibrio*), сульфатовосстанавливающие и метанообразующие бактерии (*Mycobacterium*, *Pseudomonas*, *Methanobacterium*) или отстой из другого метантенка. При интенсификации процесса метанообразования определенное внимание уделяется микробиологическому аспекту и возможности оптимизации режима за счет применения специальных штаммов и микробных ассоциаций, обладающих повышенной сбраживающей способностью, которые вносят в среду в качестве инокулята.

В настоящей работе представлены результаты сравнения показателей сбраживания навозного стока при использовании естественной и специально подобранной метаногенирующей микробной ассоциации с целью ее последующей рекомендации для промышленного применения.

Методика. Субстратом служили два образца навозного стока, полученного от крупного рогатого скота: в первом содержание сухого вещества (с.в.) составило 2,5 %, влажность — 97,5 %, во втором — соответственно 5,0 % и 95,0 %. Исходный навозный сток загружали в реакторные колбы с предварительно внесенной суспензией исследуемой микробной культуры и герметично закрывали (количество инокулята — 15-20 мл с титром клеток 10^9 - 10^{10} , рабочий объем каждой колбы — 700 мл) и помещали в термостат. Перемешивание (слабое) субстрата в колбах осуществляли с помощью магнитной мешалки, кроме того, 2-3 раза в сутки колбы интенсивно встряхивали. Из каждой реакторной колбы образуемый биогаз поступал в мерные колбы-сборники (аналог газгольдера), вытесняя находившуюся там воду, что позволяло судить о количестве выделенного биогаза.

В I опыте сравнивали процесс сбраживания образца навозного стока (2,5 % с.в.) естественной бактериальной микрофлорой и специально отобранными метаногенирующими культурами (консорциум микроорганизмов М2, включающий *Methanobacterium omelianskii* и *Methanococcus mazei*). Во все колбы помещали по 700 мл навоза. Те из них, в которых присутствовала только естественная микрофлора стока (3 шт.), служили контролем, в остальные (3 шт.) дополнительно засевали по 15 мл инокулята М2. Инкубировали при 36,0-37,0 °С. Оценивали выход биогаза и скорость его генерации в каждой реакторной колбе, затем полученные значения усредняли. Во II эксперименте сравнили характеристики процесса при использовании М2 и еще одного консорциума микроорганизмов — М5, в который дополнительно к микроорганизмам М2 включили штаммы, также взятые из коллекции лаборатории технологий промышленного биосинтеза (ОАО «ГосНИИсинтезбелок») — *Corynebacterium* sp., *Pseudomonas* sp. и *Arthrobacter simplex*. Суспензию выращенных культур (консорциум М5) вносили в реакторные колбы (3 шт.) с навозным стоком (5,0 % с.в.). Контролем служили реакторные колбы (3 шт.), в которых использовали консорциум М2 на том же навозном стоке (5,0 % с.в.). Количество инокулята — по 20 мл на каждую колбу, объем вносимого субстрата — по 700 мл, температура инкубации — 37,0-37,5 °С.

Приведены среднеарифметические значения из трех опытов. Результаты выполненных экспериментов использовали для расчетов с целью теоретического обоснования оптимизации процесса сбраживания и практических рекомендаций по интенсификации технологии получения биогаза из навозных стоков.

Результаты. Эффективность метанового сбраживания навозного стока в лабораторных экспериментах. Консорциум микроорганизмов М2 (I опыт) выбрали как наиболее устойчивый к изменяемым параметрам процесса. При визуальном сравнении было отмечено, что уже на 2-е сут при добавлении метаногенерирующих микроорганизмов происходило интенсивное газовыделение, причем объем образуемого биогаза особенно заметно увеличивался после встряхивания колбы. В контрольных колбах (сбраживание естественной микрофлорой) повышение количества биогаза в мерных стаканах регистрировали только на 3-4-е сут.

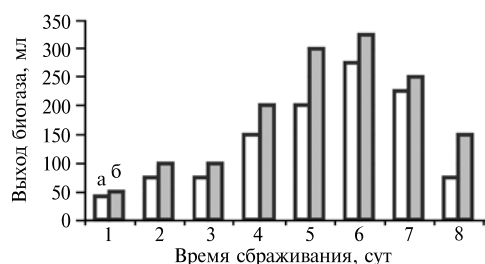


Рис. 1. Выход биогаза при сбраживании навозного стока в контроле (а, присутствие естественной микрофлоры стока) и в опыте (б, дополнительное внесение микробного консорциума М2, включающего *Methanobacterium omelianskii* и *Methanococcus mazei*).

Новый консорциум был сконструирован для улучшения показателей сбраживания и реализации двухстадийной схемы процесса, исходя из идеи сочетания микроорганизмов М2 с бактериями, обеспечивающими ускоренную переработку исходного навоза на начальной стадии метанового сбраживания.

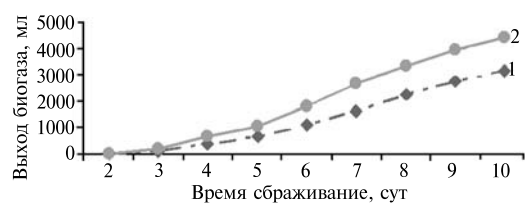


Рис. 2. Динамика выхода биогаза при использовании консорциумов микроорганизмов М2 (*Methanobacterium omelianskii* и *Methanococcus mazei*) и М5 (*Methanobacterium omelianskii*, *Methanococcus mazei*, *Corynebacterium sp.*, *Pseudomonas sp.* и *Arthrobacter simplex*) (соответственно 1 и 2).

личилась на 24 % (выход биогаза 3000 мл достигался за 7,7 сут против 9,5 сут).

Из полученных экспериментальных данных следовало, что коэффициент удельной скорости роста (μ) для естественной микрофлоры навоза составляет $0,05 \text{ сут}^{-1}$, тогда как для предложенного консорциума М5 — $0,08 \text{ сут}^{-1}$.

Расчет и оптимизация технологического процесса и схемы метанового сбраживания навозного стока.

В варианте с использованием консорциума М2 процесс метаногенерации протекал интенсивнее и обеспечил больший выход биогаза (рис. 1). Важным результатом опыта стало выявленное ускорение сбраживания с помощью выбранного консорциума. Так, в контроле 1000 мл биогаза выделялось за 9 сут, в опыте — за 8 сут, то есть этот период сократился на 12,5 %.

Во II опыте при использовании консорциума М2 процесс сбраживания протекал интенсивнее, чем в I опыте, что связано с большим содержанием сухих веществ в исходном навозном стоке и некоторым увеличением объема инокулята. В свою очередь, консорциум М5 по скорости образования биогаза и по его количеству заметно превосходил М2 (рис. 2). Так, скорость метаногенерации увеличилась на 24 % (выход биогаза 3000 мл достигался за 7,7 сут против 9,5 сут).

Полученные в лабораторных экспериментах результаты, а именно увеличение выхода биогаза за фиксированный период, послужили основанием для рекомендаций по оптимизации промышленной биотехнологии сбраживания навозного стока с учетом возможного ускорения процесса метаногенерации при использовании рекомендованного консорциума М5.

Разработанный нами принцип оптимизации процесса (16) предусматривает возможность при определенном режиме постепенно замещать исходную популяцию микроорганизмов навозного стока более эффективными быстрорастущими метаногенерирующими бактериями (в нашем случае консорциумом микроорганизмов М5).

Проведем теоретический анализ замещения культур в метантенке, работающем в непрерывном режиме, и выполним соответствующие расчеты. Запишем скорость роста микроорганизмов в метантенке на протоке:

$$dX/d\tau = \mu X - DX, \quad [1]$$

Изменения количества биомассы в популяциях $X_1(\tau)$ и $X_2(\tau)$ составят:

$$X_1(\tau) = X_1(0)e^{[\mu_1 - D(\tau)]\tau}, \quad [2]$$

$$X_2(\tau) = X_2(0)e^{[\mu_2 - D(\tau)]\tau}, \quad [3]$$

где $X_1(0)$, $X_2(0)$ — начальные значения количества биомассы при $\tau = 0$; μ_1 и μ_2 — значения коэффициентов скорости роста популяций X_1 и X_2 ; $D(\tau)$ — текущее значение коэффициента разбавления (проток), $1/\tau$; τ — время от начала замещения, ч.

Значение коэффициента скорости роста микроорганизмов определенной популяции зависит от концентрации субстрата или сырья S , в частности по зависимости Моно:

$$\mu(S) = \mu_{1,2}S/(K_S + S). \quad [4]$$

В диапазоне изменения значений $\mu_1 < D(\tau) < \mu_2$, согласно зависимостям [2] и [3], происходит уменьшение популяции X_1 и увеличение популяции X_2 .

Условие сохранения режима переработки субстрата (сырья):

$$X_1(\tau) + X_2(\tau) = \alpha(S_0 - S_k), \quad [5]$$

где S_0 — концентрация субстрата в подаваемом потоке V_τ , $\text{м}^3/\text{ч}$; S_k — остаточная концентрация субстрата, $S_k \ll S_0$; α — коэффициент выхода биомассы популяций.

Из соотношений [1]-[3] после преобразований следует:

$$D(\tau) = \mu_1 + Z(\tau)(\mu_2 - \mu_1), \quad [6]$$

где

$$Z = [D(\tau)/\mu_1 - 1]/[\mu_2/\mu_1 - 1]. \quad [7]$$

При $t = (\mu_2 - \mu_1) [8]$

$$Z(t) = 1/t \ln[1 + Z(0) \times (e^t - 1)], \quad [9]$$

где

$$Z(0) = 1/[1 + X_1(0)/X_2(0)]. \quad [10]$$

Уравнения [6]-[10] определяют расчетный режим процесса в метантенке, обеспечивающий замещение исходной популяции $X_1(\tau)$ более эффективной популяцией $X_2(\tau)$ и ее дальнейшее развитие в непрерывно работающем аппарате.

Для расчета степени замещения популяции X_1 популяцией X_2 из зависимостей [3] и [6]-[10] можно получить соотношение для X_2 :

$$X_2(\tau) = X_2(0)e^{(1-Z)\tau}. \quad [11]$$

Численные значения величины удельной скорости роста для исходной и новой популяции определяли из данных периодических процессов. Полученные средние значения по периодическим режимам сбражива-

ния составили:

$$\mu_1 = 1/X_1(dX_1/dt) = 0,05 \text{ сут}^{-1}, \quad [12]$$

$$\mu_2 = 1/X_2(dX_2/dt) = 0,08 \text{ сут}^{-1}. \quad [13]$$

В этом случае при засеве предлагаемого консорциума микроорганизмов в количестве 10 %, то есть когда $X_2(0) = 10 \% \times X_1(0)$, для внесенной популяции по промежуткам времени получим в результате расчета согласно [11] следующие значения:

$$X_2(10 \text{ сут}) = 0,42, \text{ или } 42 \% [14],$$

$$X_2(20 \text{ сут}) = 0,77, \text{ или } 77 \% [15],$$

$$X_2(30 \text{ сут}) = 0,91, \text{ или } 91 \%, \text{ то есть } X(\infty) = 1,0 [16].$$

Практическая задача состоит в получении технико-экономического эффекта от использования популяции с большей скоростью роста, в том числе с повышенным выходом биогаза при уменьшении количества несброженного субстрата. Для решения этой задачи примем начальную концентрацию сбраживаемого сырья S_0 равной 1,0 при конечной концентрации сырья S_2 .

Количество переработанного субстрата в аппарате может быть рассчитано при задаваемой исходной и конечной (на выходе аппарата) концентрации лимитирующего субстрата (S) и известной скорости роста культуры $\mu(S)$, например по зависимости Моно [4]. Рассмотрим варианты соединения аппаратов в схеме. В типовом случае метантенки работают параллельно и общее количество переработанного субстрата (их производительность по сырью) определяется как сумма по всем аппаратам. В другом варианте аппараты соединены последовательно. Тогда получим зависимость:

$$V_r(S_0 - S_2) = V_1\mu(S_1)(S_0 - S_1) + V_2\mu(S_2)(S_0 - S_2), \quad [17]$$

где V_1, V_2 — рабочие объемы аппаратов, м^3 ; V_r — проток через аппараты, $\text{м}^3/\text{сут}$.

Для стационарного непрерывного режима работы первого аппарата имеем:

$$\mu(S_1) = V_r/V_1 = D, \quad [18]$$

$$V_1 = V_r(K_S + S_1)/[\mu_m S_1]. \quad [19]$$

С учетом этих зависимостей получаем:

$$V_2 = V_r(K_S + S_2)(S_1 - S_2)/[\mu_m S_2(S_0 - S_2)]. \quad [20]$$

Оптимальное значение S_1 может быть выбрано, исходя, например, из условия минимизации суммарного объема аппаратов V_1, V_2 .

Скорость образования биогаза (Q_r) в аппаратах (V_1, V_2) с учетом переработанного в них сырья рассчитывается по соотношениям:

$$Q_{r1} = K_r(S_0 - S_1)V_r, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad [21]$$

$$Q_{r2} = K_r(S_1 - S_2)V_r, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad [22]$$

где K_r — количество биогаза, образующегося при утилизации (сбраживании) 1 м^3 субстрата, которое зависит от состава сырья и скорости синтеза.

Рассмотрим практический пример расчета применительно к агрокомплексу, где планируется ввод в действие трех промышленных метантенков с рабочим объемом по 1200 м^3 при количестве поступающего на переработку навоза 180 $\text{м}^3/\text{сут}$.

При классической (типовой) технологической схеме все метантенки работают параллельно, проток через каждый аппарат — по 60 $\text{м}^3/\text{сут}$ (в сумме 180 $\text{м}^3/\text{сут}$). Используется исходная (естественная) микробная популяция со средней удельной скоростью роста $\mu_1 = 1/X_1(dX_1/dt) = 0,05 \text{ сут}^{-1}$. Для стационарного непрерывного режима $D = 180/3600 = 0,05 \text{ сут}^{-1}$, что соответствует удельной скорости роста этой популяции (μ_1) согласно [18].

Из уравнения Моно определим значение количества остаточного субстрата на выходе каждого из параллельно работающих аппаратов:

$$S_1 = K_S / (\mu_m / D - 1), \quad [23]$$

где K_S , μ_m — коэффициенты модели: $K_S = 0,09$, $\mu_m = 0,10 \text{ сут}^{-1}$ (по данным опытов). Расчетная величина S_1 составит: $S_1 = 0,09 / (0,10 / 0,05 - 1) = 0,09$.

Для оптимизированного процесса при реализации потенциала более быстро растущей популяции три метантенка целесообразно использовать по двухстадийной схеме (два — на первой стадии, один — на второй). Каждый аппарат имеет тот же рабочий объем (1200 м^3) при том же общем протоке субстрата ($V_\tau = 180 \text{ м}^3/\text{сут}$). В схеме используем метод замещения и, соответственно, микробный консорциум М5 со средней удельной скоростью роста $\mu_2 = 1/X_2(dX_2/dt) = 0,08 \text{ сут}^{-1}$.

Кинетические коэффициенты модели Моно, согласно экспериментальным данным, составили: $K_S = 0,09$; $\mu_m = 0,120 \text{ сут}^{-1}$; для стационарного режима с новой культурой $D_1 = 180 / (2 \times 1200) = 0,075 \text{ сут}^{-1}$, что соответствует скорости роста новой популяции (μ_2).

Остаточная концентрация субстрата после первой стадии:

$$S_1 = K_S / (\mu_m / D_1 - 1) = 0,15. \quad [24]$$

Коэффициент разбавления на второй стадии:

$$D_2 = 180 / 1200 = 0,15 \text{ сут}^{-1}.$$

Остаточная концентрация субстрата после второй стадии:

$$S_2 = -b + \sqrt{b^2 + K_S S_1 / (1 - \mu_m / D_2)}, \quad [25]$$

где

$$b = 0,5[(K_S + \mu_m / D_2 - S_1) / (1 - \mu_m / D_2)]. \quad [26]$$

После подстановки значений в [25] и [26] имеем $S_2 = 0,018$ [27].

Коэффициент K_r при одинаковых условиях по сырью зависит также от скорости роста микробной популяции, определяющей затраты на энергетический и пластический обмен в клетках.

Примем зависимость вида:

$$K_r(\mu_2) / K_r(\mu_1) = [1 + 0,1(\mu_2 / \mu_1)]. \quad [28]$$

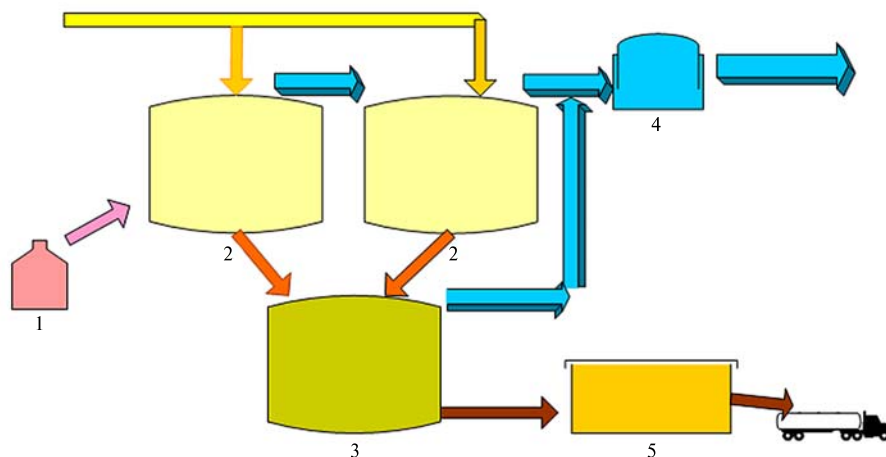


Рис. 3. Принципиальная схема предложенной оптимизированной установки для метанового сбраживания навозного стока и получения биогаза: 1 — засевной ферментер, 2 — метантенки 1-й стадии, 3 — метантенок 2-й стадии, 4 — газгольдер биогаза, 5 — сборник перебродившего навоза (жидкое удобрение).

При одностадийном процессе метанового сбраживания, согласно экспериментальным данным, при $D = 0,050 \text{ сут}^{-1}$ имеем значение $K_r = 20 \text{ м}^3 \text{ биогаза}/\text{м}^3 \text{ навоза}$. В варианте с консорциумом М5 по зависимости [28] получаем для $\mu_2 = 0,075 \text{ сут}^{-1}$ значение $K_r = 23 \text{ м}^3 \text{ биогаза}/\text{м}^3 \text{ навоза}$.

Определим выход биогаза для рассмотренных вариантов техноло-

гических схем.

Для классической одностадийной (параллельной) схемы выход биогаза $Q_{Г1} = Q_{ж}K_r(S_0 - S_1) = 180 \times 20(1 - 0,09) = 3276 \text{ м}^3/\text{сут}$ [29] при остаточной концентрации несброженного сырья $S_1 = 0,090$ (9 %), тогда как для оптимизированной двухстадийной технологической схемы получаем $Q_{Г2} = Q_{ж}K_r(S_0 - S_2) = 180 \times 23(1 - 0,018) = 4065 \text{ м}^3/\text{сут}$ [30] при остаточной концентрации несброженного сырья $S_2 = 0,018$ (~ 2 %). Следовательно, выход биогаза увеличился на $789 \text{ м}^3/\text{сут}$, или на 24 %.

Предлагаемая принципиальная схема организации двухстадийного процесса сбраживания по рассмотренному варианту расчета приведена на рисунке 3.

Таким образом, данные лабораторных опытов и результаты выполненных расчетов показывают, что использование рекомендуемого способа интенсификации метанового сбраживания за счет применения быстроразмножающейся популяции метаногенерирующих микроорганизмов, реализации режима замещения культур и предлагаемой модернизированной схемы двухстадийной работы метантенков обеспечивает повышение эффективности производства биогаза вследствие сокращения продолжительности процесса и увеличения выхода продукта.

ОАО «ГосНИИсинтезбелок»,
109004 Россия, г. Москва, ул. Солженицына, 27,
e-mail: Vinarov@hotmail.com

Поступила в редакцию
12 ноября 2012 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2013, № 6, pp. 27-35

OPTIMIZED SCHEMES FOR FERMENTATION OF FARM LIVESTOCK WASTES USING METHAN GENERATING ASSOCIATION

A.Yu. Vinarov, D.P. Sokolov, V.N. Smirnov, Z.N. Robysheva

Scientific Research Institute of Protein Biosynthesis, 27, ul. Solzhenitsyna, Moscow, 109004 Russia, e-mail Vinarov@hotmail.com

Received November 12, 2012 27

doi: 10.15389/agrobiology.2013.6.27eng

Abstract

Animal and poultry farms are known to pollute soil, water and air, being even more dangerous for environment than the large industrial complexes. Production of biofuels from different organic wastes is obviously effective with respect to the environment problems and as a regional source of energy. It also stimulates the development of wastless schemes in agriculture and farm livestock. A significant number of industrial complexes for biomethan production are located in Africa, Latine America, Asia and the Near East. The countries in the Western Europe, in particular Germany and France, are also very interested in the biofuel produced from wastes. We considered the approach to intensification of non-stop biogase production by fermentation, using a succession of the natural microflora of manure with more effective microbial association of methan generating bacteria. The results of thermophilic fermentation of manure were used as an experimental base. This approach allows to recommend for practical use the optimized technological scheme of methan tanks connection, which provides for the increased rate of fermentation and biogase output, when the manure wastes are used as a substrate for bacterial association of *Methanobacterium omelianskii*, *Methanococcus mazei*, *Corynebacterium* sp., *Pseudomonas* sp. and *Arthrobacter simplex*.

Keywords: ecology, dungy stock, anaerobic digestion, biofuels, biogas, natural microflora of manure, a consortium of microorganisms, process optimization, the replacement cultures of microorganisms, anaerobic digester, the optimal scheme of fermentation.

REFERENCES

1. Bykov V.A., Vinarov A.Yu., Gradova N.B., Koval'skii Yu.V. *Khimicheskii kompleks (Antologiya: Stroiteli Rossii. XX-XXI vek)* [Chemical industry. Russian builders in XX-XXI: Anthology]. Moscow, 2007: 406-424.
2. Mironenko M.A. *Krupnye zhivotnovodcheskie komplekсы i okruzhayushchaya sreda* [Large livestock complexes and environment]. Moscow, 1980.

3. Vinarov A.Yu., Ipatova T.V., Sokolov D.P., Smirnov V.N., Pantelev V.I. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*, 1997, 9: 17-21.
4. Vinarov A.Yu., Ipatova T.V., Erina T.E. *Materialy 3-go Mezhdunarodnogo kongressa po upravleniyu otkhodami «VeistTek-2003»* [Proc. 3d Int. Congress on Waste Management «WasteTech 2003»]. Moscow, 2003: 149-150.
5. Vinarov A.YU., Kukhareno A.A., Dirina E.N. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, 2008, noyabr': 14-18.
6. Dirina E.N., Vinarov A.Yu., Bykov V.A. *Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya [Agricultural Biology]*, 2008, 3: 24-32.
7. Vinarov A.Yu., Sokolov D.P., Smirnov V.N. et al. *Moskovskaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Biotekhnologiya: ekologiya krupnykh gorodov»* [Biotechnology: ecology of large cities (Moscow Int. Conf.)]. Moscow, 2010: 317-318.
8. Varfolomeev S.D., Kalyuzhnyi S.V. *Kineticheskie osnovy mikrobiologicheskikh protsessov* [Kinetics of microbial processes]. Moscow, 1990.
9. Dubrovskii V.S., Viestur U.E. *Metanovoe sbrazhivanie sel'skokhozyaistvennykh otkhodov* [Methane fermentation of rural wastes]. Riga, 1988.
10. Kuznetsov A.E., Gradova N.B. *Nauchnye osnovy ekobiotekhnologii* [Scientific basis for ecobiotechnology]. Moscow, 2006.
11. Chartier P., Meriaux S. Biogas technology. *Recherche*, 1980, 11(113): 766-776.
12. Gyunter L., Gol'dfarb L. *Metantenki* [Methane tanks] Moscow, 1991.
13. Vinarov A.Yu., Gordeev L.S., Kukhareno A.A., Panfilov V.I. *Fermentatsionnye apparaty dlya protsessov mikrobiologicheskogo sinteza /Pod redaktsiei V.A. Bykova* [Fermentation apparatuses for microbial synthesis. V.A. Bykov (ed.)]. Moscow, 2005.
14. Baader V. *Biogaz: teoriya i praktika* [Biogas: theory and practice]. Moscow, 1982.
15. Hashimoto A.G. Thermophilic and mesophilic anaerobic fermentation of swine manure. *Agr. Wastes*, 1983, 6: 175-191.
16. Vinarov A.Yu., Sokolov D.P., Robysheva Z.N., Koval'skii Yu.V. *Materialy VI Moskovskogo Mezhdunarodnogo kongressa «Biotekhnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya»*. Moscow, 2011, chast' 1: 266. [Biotechnology: state and prospects (Proc. Moscow VI Int. Congress, Part 1)].