

УДК 661.722.098.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ПОСЛЕСПИРТОВОЙ БАРДЫ

И. Н. КУЗНЕЦОВ<sup>+</sup>, Н. С. РУЧАЙ, А. И. ЛЕМБОВИЧ

УО «Белорусский государственный технологический университет», ул. Свердлова, 13а, г. Минск, Беларусь.

*Исследован процесс анаэробного сбраживания послеспиртовой барды и фугата барды в периодических биореакторах и в проточном биореакторе UASB-типа. Установлено, что в термофильных условиях (50 °С) скорость биоконверсии сухих веществ послеспиртовой барды в 1,3 раза выше, чем в мезофильных (30 °С). Присутствие взвешенных веществ в барде снижает степень биотрансформации компонентов барды. Предпочтительна анаэробная переработка фугата барды, при которой в условиях периодического процесса достигается степень биотрансформации компонентов по сухим веществам 76,2%, по показателю ХПК 89,7%. Взвешенные вещества барды целесообразно использовать для получения кормового продукта. Смоделирован непрерывный процесс сбраживания фугата барды в UASB-реакторе. При времени удержания фугата в биореакторе 17 суток степень биотрансформации сухих веществ составила 74,7%, выход биогаза 14,6 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, концентрация метана в биогазе 65%.*

### Введение

В отечественной спиртовой отрасли остается нерешенной проблема использования крупнотоннажного отхода – послеспиртовой барды, количество которой во много раз превосходит выход продукта и достигает 135–150 м<sup>3</sup> на 1000 дал этанола. При масштабах производства этанола в Республике Беларусь 9,6 млн. дал в год общий объем послеспиртовой барды составляет около 1,3 млн. м<sup>3</sup>. Основным сырьем для производства высококачественного этанола в Республике Беларусь является зерно злаков (пшеница, рожь, тритикале). Зерновая послеспиртовая барда содержит 6–8% сухих веществ, которые включают 26–28% сырого протеина, 12,8–13,4% клетчатки, 6,0–7,5% жира, 40,0–50,0% безазотистых экстрактивных веществ, 7,6–7,8% минеральных веществ. Около 50% сухих веществ находятся в барде во взвешенном состоянии (дробица). В барде присутствуют мертвые клетки дрожжей-продуцентов этанола (источник протеина), органические кислоты, аминокислоты, витамины, микро- и макроэлементы. Наличие протеина и биологически активных веществ придает барде самостоятельную кормовую ценность, в связи с чем основным методом утилизации послеспиртовой барды в отечественной практике является реализация натуральной барды в качестве кормовой добавки. Однако барда не подлежит длительному хранению (развиваются гнилостные

процессы), имеет место сезонность спроса на барду, существенны затраты на доставку ее потребителю. Кроме того, переваримость сырого протеина барды низкая и составляет около 52%. Анализ мирового опыта свидетельствует о целесообразности анаэробной переработки барды с получением биогаза [1, 2]. Настоящая работа имеет своей целью исследование процесса метангенерации при анаэробной переработке барды.

### Материалы и методы исследований

В экспериментах использовали ржаную послеспиртовую барду спиртзавода КПП «Полесье» (Гомельская область) и фугат барды (далее – фугат), характеристика которых представлена в экспериментальной части статьи.

Процесс анаэробной переработки барды и фугата моделировали в биореакторах периодического и непрерывного действия. Биореакторы периодического действия имели объем 0,5 л и содержали волокистую насадку «ВИЯ» в количестве 12 г/л для закрепления микроорганизмов анаэробного биоценоза. Периодический процесс анаэробной переработки барды и фугата проводили параллельно в мезофильном (30±0,5 °С) и термофильном (50±0,5 °С) режимах [3]. Температуру в биореакторах поддерживали термостатированием в сузовоздушных термостатах. В качестве проточного биореактора использовали модель UASB-

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку.

реактора (реактор с восходящим потоком жидкости через слой гранулированной биомассы микроорганизмов), который отличается высокой производительностью при переработке органосодержащих жидких отходов [4]. Лабораторный UASB-реактор (рис. 1), функционирующий в термофильном режиме (50 °С), оснащен двухуровневым газоилоотделительным устройством и имеет общий объем 9 л (полезный объем 8 л). Фугат барды дозировали в биореактор с помощью перистальтического насоса с регулированием расхода в пределах 0,2–2 л/сут.

Для измерения объема образующегося в биореакторах биогаза использован счетчик газа MGC-1 (Ritter, Германия), а также система, базирующаяся на принципе вытеснения газом жидкости из измерительного сосуда при атмосферном давлении.

Анаэробное сбраживание барды и фугата осуществляли за счет спонтанно развивающихся

микроорганизмов и с иницированием процесса метангенерации предварительно накопленным на послеспиртовой барде анаэробным активным илом. Инокулят в виде концентрированного анаэробного активного ила вносили в сбраживаемую массу после окончания кислотогенной стадии и корректировки показателя pH среды до уровня 6,5–6,8 в количестве 30 мл в биореакторы объемом 0,5 л и 150 мл в UASB-реактор.

Состав биогаза определяли газохроматографическим методом с использованием детектора по теплопроводности и микронабивной колонки с цеолитом NaX. Температура хроматографического анализа 40 °С с программированным повышением со скоростью 2 град/мин до 205 °С, газ-носитель – гелий.

Газохроматографический метод анализа состава биогаза позволяет количественно определить водород, азот, метан и диоксид углерода с относительной погрешностью 5–8% (рис. 2).

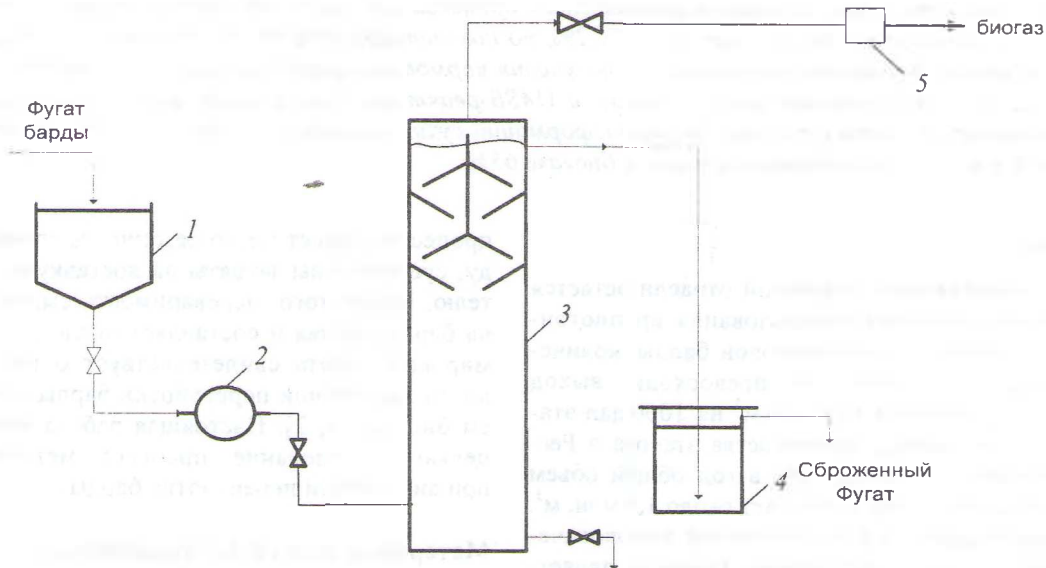


Рис. 1. Схема установки для анаэробной переработки фугата послеспиртовой барды: 1 – емкость для фугата; 2 – перистальтический насос; 3 – UASB-реактор; 4 – емкость для сброженного фугата; 5 – счетчик биогаза

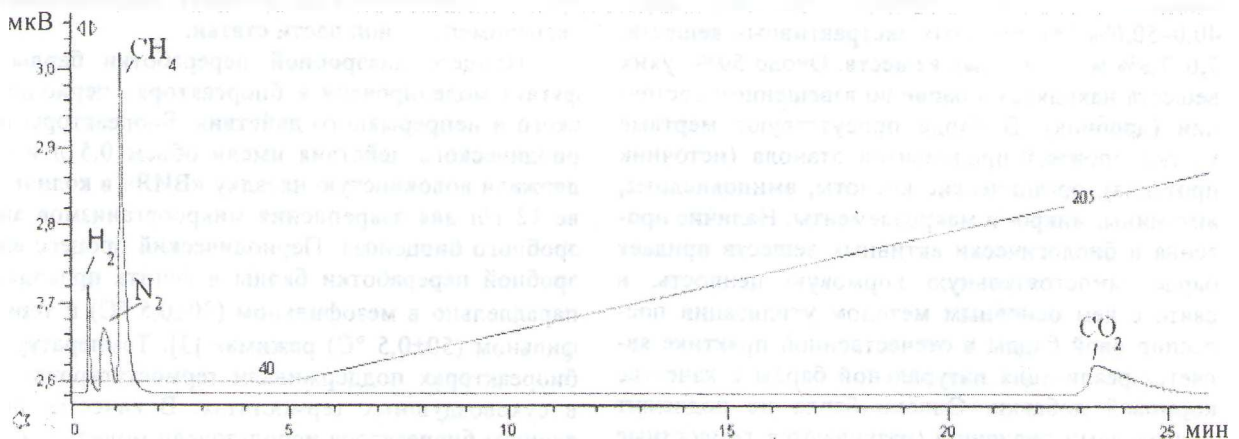


Рис. 2. Хроматографическое разделение компонентов биогаза

Контроль процесса анаэробной переработки барды и фугата осуществляли по изменению содержания сухих веществ, показателя химического потребления кислорода (ХПК), величины рН ферментационной среды и по количеству выделившегося биогаза.

Содержание сухих веществ в барде и фугате и величину показателя ХПК определяли стандартными методами [5].

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На первом этапе исследований моделировали процесс анаэробной переработки барды и фугата в биореакторах периодического действия в присутствии микроорганизмов, спонтанно развивающихся в мезофильных (30 °С) и термофильных (50 °С) условиях (без предварительной инокуляции анаэробным илом).

Эксперименты показали, что в течение первых 11-ти суток анаэробной обработки барда и фугат закисляются до величины рН 3,5–3,7. Кислая среда неблагоприятна для развития метаногенных бактерий. В связи с этим ферментационную среду в биореакторах нейтрализовали до рН 6,5–6,8.

Интегральные кривые накопления биогаза при обработке барды и фугата с участием спонтанно развивающихся микроорганизмов (рис. 3 и 4) свидетельствуют о преимуществе термофильного режима по скорости процесса перед мезофильным. Однако выход биогаза в результате анаэробной обработки барды и фугата в течение 60 суток невысокий из-за низкой скорости естественного накопления биомассы метаногенных бак-

терий. Инокулирование биореакторов анаэробным активным илом привело к ускорению процесса метангенерации и увеличению выхода биогаза (табл. 1). При этом преимущества термофильного режима по скорости процесса сохранились: в термофильных условиях степень биотрансформации сухих веществ барды и фугата выше в 1,3 раза; практически в той же пропорции ниже величина показателя ХПК термофильно сброженных барды и фугата.

Выход биогаза при переработке барды в 1,4 раза выше, чем из фугата. Однако степень биотрансформации сухих веществ барды, обрабатываемой в мезофильном и термофильном режимах существенно ниже (43,1%; 55,6%) соответствующих показателей для фугата барды (52,4%; 69,0%).

Это свидетельствует о том, что для рационального использования компонентов барды целесообразна анаэробная переработка фугата барды.

Максимальная величина показателей процесса метангенерации при анаэробной переработке фугата барды в течение 80 суток составила (табл. 2): выход биогаза – 14,5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>, степень биотрансформации сухих веществ – 76,2%, степень биотрансформации компонентов фугата по показателю ХПК – 89,7%.

Достаточно высокая степень снижения величины показателя ХПК при анаэробной обработке фугата барды открывает возможность глубокой очистки фугата с последующим возвратом его в основное производство.

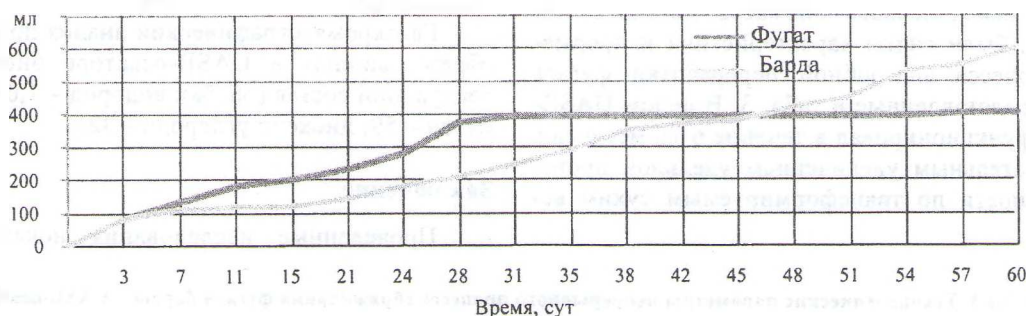


Рис. 3. Интегральные кривые накопления биогаза при температуре 30 °С

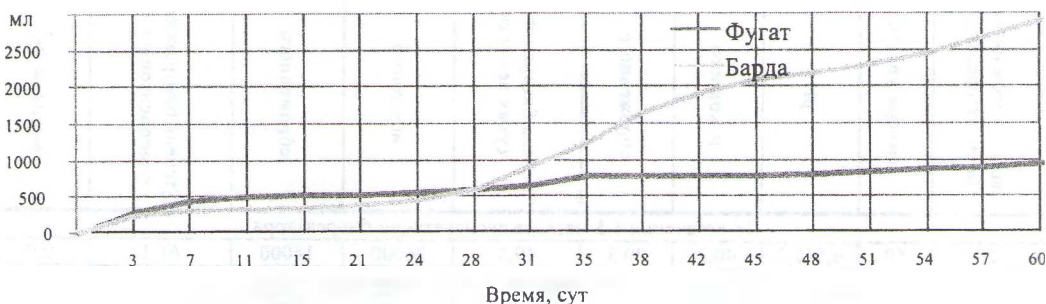


Рис. 4. Интегральные кривые накопления биогаза при температуре 50 °С

Таблица 1. Анаэробная переработка послеспиртовой барды и фугата в биореакторе периодического действия (продолжительность процесса 60 сут)

Показатель	Барда			Фугат		
	исходная	после обработки при 30 °С	после обработки при 50 °С	исходный	после обработки при 30 °С	после обработки при 50 °С
Сухие вещества, %	7,2	4,1	3,2	4,2	2,0	1,3
ХПК, мг/л	66000	35600	28000	37000	12600	6600
Количество биогаза, мл	–	4800	6200	–	3 500	4600
Выход биогаза на единицу объема жидкой фазы, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	–	12,0	16,0	–	8,8	11,5
Степень биотрансформации сухих веществ, %	–	43,1	55,6	–	52,4	69,0
Степень биотрансформации компонентов по показателю ХПК, %	–	46,1	57,6	–	65,9	82,2

Таблица 2. Анаэробная переработка фугата барды в биореакторе периодического действия (продолжительность процесса 80 сут)

Показатель	Фугат		
	исходный	после обработки при 30 °С	после обработки при 50 °С
Сухие вещества, %	4,2	1,5	1,0
ХПК, мг/л	37000	8000	3800
Количество биогаза, мл	–	4900	5800
Выход биогаза на единицу объема жидкой фазы, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	–	12,2	14,5
Степень биотрансформации сухих веществ, %	–	64,3	76,2
Степень биотрансформации компонентов по показателю ХПК, %	–	78,4	89,7

В лабораторном UASB-реакторе моделировали непрерывный процесс сбраживания барды. После 4,5 месяцев работы UASB-реактора, в течение которых накапливалась биомасса метаногенных бактерий, были сняты характеристики непрерывного процесса анаэробной переработки фугата барды, представленные в табл. 3. В целом UASB-реактор функционировал в течение 6-ти месяцев с последовательным увеличением удельной производительности по трансформируемым сухим веществам.

Как следует из данных табл. 3, высокие показатели процесса метангенерации в UASB-реакторе достигнуты при времени удержания фугата в аппарате 17 суток. Дальнейшее увеличение скорости протока среды с уменьшением времени удержания до 7,4 суток привело к снижению эффективности процесса, что связано с перегрузкой биореактора по органическим веществам. Результаты моделирования непрерывного процесса в UASB-реакторе подтвердили возможность достижения высоких показателей процесса метангенерации, коррелирующих с данными, полученными в периодическом режиме переработки фугата.

Следует отметить высокую степень трансформации сухих веществ фугата, которая составила 74,7% или 88,5% по показателю ХПК. Относительно невысокий уровень загрязненности сброженного фугата позволяет предположить возможность его глубокой очистки с последующим использованием в производстве или сбросом в городскую водоотводящую сеть.

Газохроматографический анализ показал, что образовавшийся в UASB-реакторе биогаз имел следующий состав (об. %): водород – 1,0; азот – 8; метан – 59; диоксид углерода – 32.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что

Таблица 3. Технологические параметры непрерывного процесса сбраживания фугата барды в UASB-реакторе

Режим сбраживания фугата				Сухие вещества фугата, г/л		Степень биотрансформации сухих веществ, %	Показатель ХПК фугата, мг/л		Степень биотрансформации компонентов по ХПК, %	Биогаз	
скорость протока, сут <sup>-1</sup>	время удержания в биореакторе, сут <sup>-1</sup>	температура, °С	pH	исходного	сброженного		исходного	сброженного		выход, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	концентрация метана, % об.
По истечении 4,5 месяцев эксплуатации биореактора											
0,05	20	50	6,5–7,2	40,2	20,3	49,5	36000	14000	61,1	9,0	59
По истечении 6-ти месяцев эксплуатации биореактора											
0,06	17	50	6,5–7,0	30,0	8,0	74,7	33000	3800	88,5	14,6	65
0,135	7,4	50	6,0–6,5	31,6	13,08	56,4	35000	10500	70,0	9,8	61

присутствие взвешенных веществ в барде снижает степень биотрансформации органических компонентов в биогаз в 1,3 раза в сравнении с фугатом барды.

С учетом повышенной температуры исходной барды (90 °С) предпочтителен термофильный режим анаэробной обработки, который в сравнении с мезофильным обеспечивает более высокую скорость процесса метангенерации и позволяет реализовать его в биореакторах меньшего объема.

Целесообразна анаэробная переработка фугата барды, которая обеспечивает возможность использования взвешенных веществ барды в кормовых целях, получение биогаза для покрытия внутрицеховых энергетических затрат и возможность глубокой очистки фугата с полным возвратом его в основное производство.

## Литература

1. European Bioethanol Fuel Association [Electronic resource] / – 2008. – Mode of access: [http://www.ebio.org/food\\_fuel.php](http://www.ebio.org/food_fuel.php). – Date of access: 10.02.2008.
2. Кузнецов, И.Н. Анализ мирового опыта в технологии переработки послеспиртовой барды / И.Н. Кузнецов, Н.С. Ручай // Труды БГТУ. – Сер. 4. – Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2010. – Вып. 18. – С. 294–301.
3. Мариненко, Е.Е. Экологические аспекты использования биогаза в СССР и за рубежом / Е.Е. Мариненко, Г.П. Комина. – М.: ВНИИЭгазпром, 1990. – 43 с. (Обзорная информация / Сер. Природный газ и защита окружающей среды).
4. Khanal, Samir Kumar. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications / Khanal, Samir Kumar. – Blackwell Pub, 2008. – 301 с.
5. Емельянова, И.З. Химико-технический контроль гидролизных производств / И.З. Емельянова. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 328 с.

---

Kuznetsov I. N., Ruchai N. S., and Lembovich A. I.  
**Study of process of anaerobic conversion of stillage.**

The process of anaerobic conversion of stillage and thin stillage in periodic bioreactors and in continuous UASB-reactor were developed. Established that speed of solids bioconversion in thermophilic (50 °С) mode is 1,3 higher than in mesophilic (30 °С). The presence of suspended solids in stillage reduces the biotransformation degree of its components. Processing of thin stillage is preferable because degree of biotransformation of components on solids of 76,2%, in terms of COD 89,7% in periodic process is reached. Suspended solids of stillage are expedient for using to obtain the feed product. Continuous process of anaerobic fermentation of thin stillage in UASB-reactor were modeled. The biotransformation degree of solids amounted to 74,7%, biogas yield – 14,6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> with concentration of methane in biogas of 65% and holding time of thin stillage in bioreactor of 17 days.

*Поступила в редакцию 21.02.2011.*

© И. Н. Кузнецов, Н. С. Ручай, А. И. Лембович, 2011.