

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 661.722.098.4

**КУЗНЕЦОВ  
ИЛЬЯ НИКОЛАЕВИЧ**

**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОСЛЕСПИРТОВОЙ БАРДЫ  
С ПОЛУЧЕНИЕМ БЕЛОКСОДЕРЖАЩЕГО КОРМОВОГО  
ПРОДУКТА И БИОГАЗА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 03.01.06 – биотехнология (в том числе бионанотехнологии)

Минск 2012

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет».

Научный руководитель **Ручай Николай Степанович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии и биоэкологии, учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Официальные оппоненты: **Капуцкий Федор Николаевич**, доктор химических наук, академик, заведующий отделом физикохимии полисахаридов НИИ физико-химических проблем Белорусского государственного университета; **Капустин Николай Федорович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией использования топливно-энергетических ресурсов НППЦ по механизации сельского хозяйства Белорусского государственного аграрного технического университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Международный экологический университет имени Сахарова»

Защита состоится 27 декабря 2012 г. в 16.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, корп. 4 ауд. 240, тел. (+375 17) 327 63 54, факс (+375 17) 327 62 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного технологического университета.

Автореферат разослан «27» ноября 2012 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент



Толкач О.Я.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Производство этанола из углеводсодержащего сырья сопровождается образованием 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 11,4 млн. дал в год общий объем послеспиртовой барды составляет около 1,5 млн. м<sup>3</sup>. Основным сырьем для производства высококачественного этанола в Республике Беларусь является зерно злаков (пшеница, рожь, тритикале).

В отечественной практике основным методом утилизации послеспиртовой барды является реализация натуральной барды в качестве кормовой добавки. Однако барда не подлежит длительному хранению, имеет место сезонность спроса на барду. Кроме того, перевариваемость сырого протеина барды низкая и составляет около 52 %. Этот показатель может быть увеличен до 85–89 % в результате аэробного культивирования на барде дрожжей рода *Candida*. При этом резко возрастает кормовая ценность барды, появляется возможность получения полноценной кормовой белково-витаминной добавки. Промышленная реализация технологии на серийном отечественном оборудовании показала ее главный недостаток: большие затраты энергии на аэрацию барды в дрожжерастильных аппаратах и на последующее обезвоживание дрожжевой биомассы при невысоком выходе продукта.

В настоящее время на предприятиях отрасли барда является обременительным отходом, создающим угрозу экологической обстановке вокруг предприятия. Несмотря на достаточно большой мировой опыт переработки барды, главным препятствием для реализации технологий являются большие энергетические затраты на производство сухих продуктов в связи с высокой влажностью барды.

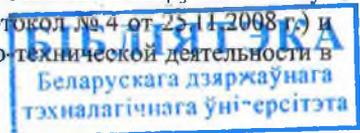
Актуальность решения проблемы переработки барды связана не только с негативным техногенным воздействием отхода на окружающую среду, но и с необходимостью глубокой переработки продовольственного сырья, а также с возможностью получения из отхода ценных для народного хозяйства продуктов, в частности, кормовой белоксодержащей добавки и биогаза.

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательских тем кафедры биотехнологии и биоэкологии УО «Белорусский государственный технологический университет»:

– «Создание технологии комплексной переработки послеспиртовой барды» (ИФЗ 28-179, утверждена Концерном «Белгоспищепром», № 20083531, науч. рук. – доцент, к.т.н. Ручай Н.С., 2008-2009 гг.);

– «Изучение закономерностей и разработка технологического процесса получения биогаза из послеспиртовой барды» (ГБ 11-038, утверждена Министерством образования Республики Беларусь, № 20113944, науч. рук. – Кузнецов И.Н., 2011 г.).

Тема диссертационной работы утверждена Советом Белорусского государственного технологического университета (протокол № 4 от 25.11.2008 г.) и соответствует приоритетным направлениям научно-технологической деятельности в



1676 ар

Республике Беларусь на 2011–2015 годы (направление «Энергетика и энергооборужение: использование вторичных энергетических ресурсов и получение топлива из отходов производства», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь №378 от 22 июня 2010 г.).

#### **Цель и задачи исследования.**

Цель работы – создание рациональной технологии комплексной переработки крупнотоннажного отхода спиртового производства послеспиртовой барды.

Цель работы обусловила постановку и решение следующих задач:

- установить закономерности процесса генерации биогаза при анаэробной переработке послеспиртовой барды, определить условия реализации и технологические параметры процесса;

- разработать способ предварительной ферментативно-микробиологической обработки барды с целью получения на основе взвешенных веществ барды обогащенной белком кормовой добавки;

- определить технологические параметры процесса анаэробной переработки жидкой части (фугата) барды с получением биогаза;

- разработать технологию комплексной переработки послеспиртовой барды с получением биогаза и кормового продукта.

**Объект исследования:** послеспиртовая ржаная барда спиртовых заводов БРУП «Гидролизный завод» (г. Бобруйск, Могилевская область) и КПП «Полесье» (д. Солтаново, Речицкий район, Гомельская область). **Предмет исследования:** технологический процесс комплексной переработки послеспиртовой барды с получением ценных продуктов.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности генерации биогаза при анаэробной переработке барды, свидетельствующие о том, что присутствие взвешенных веществ в барде снижает степень биотрансформации органических компонентов в биогаз в 1,3 раза в сравнении с фугатом барды, что обуславливает целесообразность отдельной переработки твердой и жидкой частей барды с получением кормового продукта и биогаза;

2. Закономерности и способ предварительной ферментативно-микробиологической обработки барды, включающий воздействие гидролитическими ферментами, расщепляющими трудноутилизуемый полисахарид клетчатку на 40 % с увеличением общей концентрации редуцирующих веществ (РВ) с 0,27 до 1,5 %, и культивирование на ферментированной барде вновь выделенного факультативно-анаэробного термотолерантного штамма дрожжей *Lachancea fermentati* с получением обогащенного белком кормового продукта, содержащего не менее 30 % истинного белка;

3. Технологические параметры непрерывного анаэробного сбраживания фугата барды в UASB-реакторе, обеспечивающие выход биогаза 14 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> фугата;

4. Технология комплексной переработки послеспиртовой барды с получением обогащенного белком кормового продукта и биогаза, включающая предварительную ферментативно-микробиологическую обработку барды для обогащения ее белком, анаэробное сбраживание фугата барды с генерацией биогаза, очистку

сброженного фугата ультрафильтрацией до уровня загрязненности по показателю ХПК, позволяющего осуществить сброс на городские очистные сооружения.

**Личный вклад соискателя.** Диссертант изучил научно-техническую литературу по теме работы, непосредственно участвовал в получении экспериментальных данных, составляющих основу диссертации, их анализе, обобщении и изложении материала настоящей работы. Совместно с научным руководителем к.т.н. Ручаем Н. С. осуществлял планирование экспериментов, обработку полученных данных, критическое обсуждение результатов, оформление публикаций на их основе.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения и результаты исследования доложены на международных конференциях:

международная научно-техническая конференция «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии» (г. Гродно, НАН Беларуси, ГНУ «Научно-исследовательский центр проблем ресурсосбережения, 2009 г.), международная конференция «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан–2030» (Сагиновские чтения №2), (, Казахстан, Карагандинский государственный технический университет, г Караганда, 2010 г.), международная научно-практическая конференция «Техника и технология защиты окружающей среды» (Минск, Белорусский государственный технологический университет, 2011 г.), RESET summer school (Псковский государственный университет, г. Псков, 2011), Германо-белорусский семинар «Научная кооперация – Биоэнергия» (г. Минск, НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2011), EnGo seminar (Минск, ЦНИИКИВР, 2011), Международная научно-техническая конференция «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления» (Минск, Белорусский государственный технологический университет, 2011), II Международная молодежная научно-практическая конференция «Научные стремления-2011» (Минск, НАН Беларуси, 2011), молодежный инновационный форум «Наука и бизнес» (Минск, НАН Беларуси, 2011), Belarus-Korea science and technology seminar, (Minsk, BNTU, 2011), 1-й форум Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля (Минск, БНТУ, 2012), Международная научная конференция «Россия-Беларусь-Сколково: единое инновационное пространство» (НАН Беларуси, Минск, 2012).

**Опубликованность результатов диссертации.** По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 5 - статьи в научных рецензируемых журналах (объем – 2,1 авторских листа), 4 – в материалах республиканских и международных научных конференций, 4 – тезисы докладов научных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 86 страницах, состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка, включающего 143 источников, в том числе 15 собственных публикаций соискателя, пяти приложений. Работа содержит 18 рисунков и 11 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**В первой главе** приводится обзор литературных данных по использованию послеспиртовой барды в мировой практике. Произведена технико-экономическая оценка промышленных методов переработки барды. Показана экономическая це-

лесообразность использования барды для получения энергоносителя - биогаза и кормовой белоксодержащей добавки.

Во второй главе описаны методы исследования и экспериментальные установки. Объектами исследования являлись ржаная послеспиртовая барда (барда) спиртовых заводов КПП «Полесье» (Гомельская область, Речицкий район, д. Солтаново) и БРУП «Гидролизный завод» (г. Бобруйск), а также фугат барды. Барда характеризуется следующими параметрами: pH 4,2-4,5, взвешенные вещества 45-49 г/дм<sup>3</sup>, сухой остаток – 70-80 г/дм<sup>3</sup>, показатель ХПК – 60 000-80 000 мг О<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup>, клетчатка – 13-15% от сухих веществ, сырой протеин – 24-28% от сухих веществ. Температура исходной барды – 90-95 °С.

Процесс анаэробной переработки барды и фугата моделировали в биореакторах периодического действия объемом 0,5 дм<sup>3</sup>, функционирующих в мезофильном (30±0,5 °С) и термофильном (50±0,5 °С) режимах и оснащенных счетчиком газа MGC-1, Ritter (Германия). Биореакторы инокулировали концентрированным анаэробным активным илом, предварительно накопленным на послеспиртовой барде.

В качестве проточного биореактора для непрерывного сбраживания фугата барды использовали модель UASB-реактора (реактор с восходящим потоком жидкости через слой гранулированной биомассы микроорганизмов), который отличается высокой производительностью. Лабораторный UASB-реактор, функционирующий в термофильном режиме (50 °С), оснащен двухуровневым газоилоотделительным устройством и имеет общий объем 9 дм<sup>3</sup> (полезный объем 8 дм<sup>3</sup>). Фугат барды дозировали в биореактор с помощью перистальтического насоса с регулированием расхода в пределах 0,2-2 дм<sup>3</sup>/сут.

Анализ сбраживаемой массы по величине показателя ХПК проводили стандартным экспресс-методом на приборе, состоящем из термореактора HI 83980 и спектрофотометра HI 83214 (HANNA instruments, Германия). Для отдельной переработки жидкой и твердой фаз осуществляли разделение барды центрифугированием (5000 g, 20 мин). Содержание сухих веществ в жидкой и твердой фазах устанавливали весовым методом с использованием определителя влажности ЭВЛАС-2М (Россия). Для сравнительной оценки изменения состава сухих веществ барды после сбраживания использовали метод термогравиметрии (TA – 4000, METTLER TOLEDO, Швейцария). Состав биогаза анализировали на газовом хроматографе Agilent 7820, HP (США) с детектором по теплопроводности и микрокапиллярной колонкой HP GS-GASPRO.

Для расщепления полисахаридных компонентов барды использовали ферментные препараты Rovabio Excel AP (производитель «Adissee», основные ферменты – глюканаза, ксиланаза, целлюлаза), Pectinex 5XL (поставщик ООО «Винхим», основные ферменты – пектиназа, гемицеллюлаза, целлюлаза), Vegazim HC (поставщик ООО «ВКМ-сервис», основные ферменты – гемицеллюлаза и целлюлаза).

Ферментный препарат в виде 1 %-ного раствора вносили в послеспиртовую барду в количестве 0,05-1,5 см<sup>3</sup> на 100 см<sup>3</sup> барды (pH 4,5) с последующей выдержкой в течение суток при температурах 42 °С и 50 °С.

Продуцент белка выделяли из микробиоты, естественно развивающейся в послеспиртовой барде при температуре 42 °С, с использованием стандартных питательных сред (сусло-бульон, сусло-агар). Чистую культуру дрожжей получали чашечным методом Коха. Для идентификации выделенного штамма стандартными методами определяли макро- и микроморфологические признаки, физиологические и биохимические особенности. Биомассу культуры накапливали в качалочных колбах на фугате ферментативно обработанной барды при температуре 42 °С в течение 24 ч. Концентрацию биомассы выделенного штамма определяли по оптической плотности суспензии на фотометре Specol 1300 (Analytik Jena AG, Германия) при длине волны 660 нм.

Качество сухой кормовой добавки на основе взвешенных веществ барды контролировали по содержанию сырого протеина по методу Кьельдаля на анализаторе состоящем из дигестора behrotest InKjel 625M и дистиллятора S3 («berh Labor-Technik», Германия), истинного белка по Барнштейну, перевариваемого белка и клетчатки по методу Кюршнера и Ганека на анализаторе Hydro 2 («berh Labor-Technik»).

Для очистки сброженного фугата барды использовали ультрафильтрационные мембраны МИФИЛ производства НИИ «Физико-органической химии» НАН Беларуси: ПА, ПС, ПАН и фторлон.

Эффективность ультрафильтрационной очистки определяли в специально сконструированной цилиндрической ячейке при давлении 0,3 МПа.

**Третья глава** посвящена анаэробной переработке послеспиртовой барды. 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.

Контроль процесса анаэробной переработки барды и фугата осуществляли по изменению содержания сухих веществ (СВ) в сбраживаемых субстратах, показателя химического потребления кислорода (ХПК), величины рН сбраживаемой массы и по количеству выделившегося биогаза.

Экспериментальные данные накопления биогаза при сбраживании натуральной барды и фугата с участием спонтанно развивающихся микроорганизмов свидетельствуют о преимуществе термофильного режима по скорости процесса перед мезофильным (табл. 1). Однако выход биогаза в результате анаэробной обработки барды и фугата в течение 60 суток невысокий из-за низкой скорости естественного накопления биомассы метаногенных бактерий.

Инокулирование биореакторов концентрированным анаэробным активным илом (в объеме 30 см<sup>3</sup> на 400 см<sup>3</sup> барды или фугата), предварительно накопленным на послеспиртовой барде, привело к ускорению процесса генерации биогаза и увеличению его выхода (табл. 2).

При этом преимущества термофильного режима по скорости процесса в инокулированных биореакторах сохранились: 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.

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

Показатель	Барда			Фугат		
	исходная барда	после обработки при 30 °С	после обработки при 50 °С	исходный фугат	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/дм <sup>3</sup>	66 000	35 600	28 000	37 000	12 600	6 600
Количество биогаза, см <sup>3</sup>	—	4 800	6 200	—	3 500	4 600
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

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 (43,1 %; 55,6 %) существенно ниже соответствующих показателей для фугата барды (52,4 %; 69,0 %).

Это свидетельствует о том, что для рационального использования компонентов барды целесообразно подвергать анаэробной переработке фугат барды.

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/дм <sup>3</sup>	37 000	8 000	3 800
Количество биогаза, см <sup>3</sup>	—	4 900	5 800
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

Максимальная величина показателей процесса генерации биогаза при анаэробном сбраживании фугата барды составила: 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 %.

Высокая степень снижения величины показателя ХПК при анаэробной переработке фугата барды открывает возможность глубокой очистки сброженного раствора с последующим использованием его взамен технической воды.

Известно, что экономически целесообразно разделение процесса анаэробной переработки субстрата на две стадии (фазы) – кислотную (преацидификация субстрата, pH 6-6,5) и метановую (генерация метана, pH 6,5-8), реализуемые в двух последовательно соединенных аппаратах. Такое технологическое решение увеличивает капитальные затраты, но при этом общая скорость анаэробной трансформации субстрата существенно возрастает.

Процесс преацидификации заключается в выдержке барды в течение нескольких суток для обеспечения развития кислотогенных микроорганизмов, осуществляющих гидролитическое расщепление биополимеров (белка, клетчатки, пектиновых веществ). Как следует из полученных экспериментальных данных, преацидификация барды при 50 °С в течение 5 сут (табл. 3) приводит к снижению содержания сухих веществ на 12 %. Преацидифицированная барда более эффективно в сравнении с натуральной осветляется отстаиванием и центрифугированием. Доля сырого протеина после преацидификации барды практически не меняется, а содержание клетчатки снижается с 13,4 до 11,6 %.

В то же время следует отметить, что часть клетчатки (7,4 % от сухого вещества) в сброженной барде остается нерасщепленной, а значит, неиспользованной.

Таблица 3 - Изменение состава сухих веществ послеспиртовой ржаной барды в процессе термофильной (50 °С) анаэробной переработки

Компоненты барды, % от сухого вещества	Натуральная барда	Преацидифицированная барда	Сброженная барда
Сухие вещества, %	7,2 ± 0,4	6,4 ± 0,3	3,2 ± 0,5
Минеральные вещества	7,9 ± 0,1	8,2 ± 0,1	33,5 ± 0,1
Органические вещества (расчетная величина)	92,1	91,8	66,5
Сырой протеин	29,1 ± 0,4	30,1 ± 0,4	26,7 ± 0,4
Клетчатка	13,4 ± 0,5	11,6 ± 0,5	7,4 ± 0,5

Таким образом, присутствие взвешенных веществ в барде снижает степень биотрансформации органических компонентов в биогаз в 1,3 раза в сравнении с фугатом барды. Трудно расщепляемым компонентом барды является клетчатка

С учетом повышенной температуры исходной барды (90 °С) предпочтителен термофильный режим анаэробной обработки, который в сравнении с мезофильным обеспечивает более высокую скорость процесса генерации биогаза и позволяет реализовать его в биореакторах меньшего объема. Термофильная анаэробная переработка фугата барды позволяет получить выход биогаза 14,5 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> при степени биотрансформации сухих веществ 76,2 % и снижении показателя ХПК фугата на 89,7 %.

В четвертой главе приведены результаты исследований по ферментативной обработке послеспиртовой барды. Высокое содержание полисахаридов в сухом веществе барды и низкая скорость их расщепления анаэробными бактериями обуславливают целесообразность предварительной ферментативной обработки барды с целью гидролиза полисахаридных компонентов до мономеров (моносахариды, уроновые кислоты), которые легко ассимилируются микроор-

ганизмами с накоплением белоксодержащей микробной биомассы. Обогащение барды микробным белком с одновременным снижением доли трудноассимилируемой клетчатки способствует получению на основе взвешенных веществ барды сухого кормового продукта с высокими потребительскими свойствами.

Ферментативную обработку барды проводили в течение суток при температурах 42 °С и 50 °С. Выбор таких температур связан с целесообразностью совмещения в одном аппарате процессов ферментативной обработки и преацидификации барды, что выгодно как технологически, так и экономически.

Степень ферментативного расщепления полисахаридов барды оценивали по содержанию редуцирующих веществ в фугате барды, доле клетчатки во

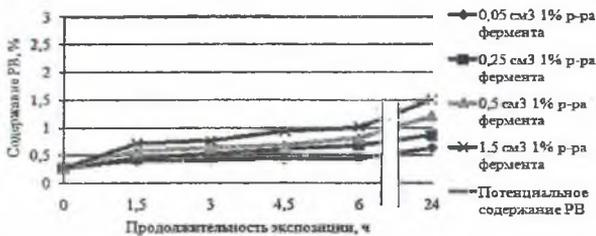


Рисунок 1 – Динамика накопления редуцирующих веществ при обработке барды ферментным препаратом Rovabio Excel AP при 50 °С

взвешенных веществах (кеке) и по увеличению показателя ХПК фугата.

По результатам исследований более эффективным гидролитическим действием обладает ферментный препарат Rovabio Excel AP (рис.1).

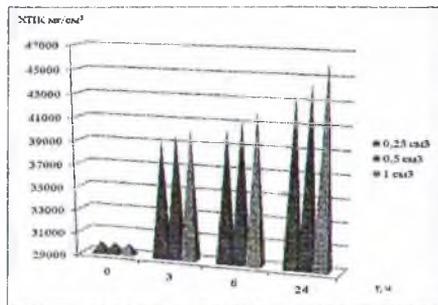
Повышенная температура (50 °С) ускоряет процессы ферментативного расщепления полисахаридов. При длительности процесса ферментативной обработки 24 ч концентрация редуцирующих веществ в барде возрастает с 0,25 до 1,5 %, что составляет 50 % от потенциального количества редуцирующих веществ.

Расщепляя полисахаридные компоненты ферментный препарат осуществляет перевод части взвешенных веществ барды в растворенное состояние, о чем свидетельствует увеличение показателя ХПК фугата барды после ферментативной обработки с 30 000 до 45 000 мг О<sub>2</sub>/ дм<sup>3</sup> (рис. 2).

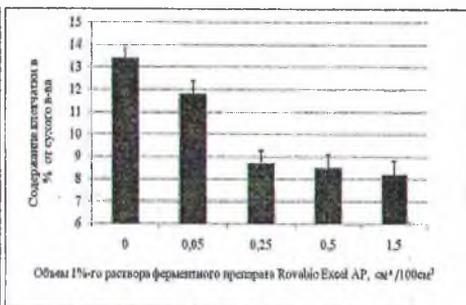
Эксперименты показали, что содержание клетчатки в сухом веществе барды снижается под воздействием фермента на 40 % (рис. 3). Дальнейший процесс расщепления клетчатки затормаживается ингибированием ферментов продуктами ферментализа.

Параметры процесса ферментативной обработки барды (42 °С, продолжительность 24 ч) удовлетворяют требованиям к процессу её преацидификации, что позволяет совместить эти технологические операции в одном аппарате.

Производственная стадия преацидификации барды характеризуется быстрым развитием кислотогенных микроорганизмов, потребляющих продукты ферментализа полисахаридных компонентов, что предотвращает ингибирование ферментов и повышает степень расщепления клетчатки.



**Рисунок 2 – Изменение показателя ХПК при обработке барды ферментным препаратом Rovabio Excel AP при 42<sup>0</sup>С**



**Рисунок 3 – Изменение содержания клетчатки в послеспиртовой барде после обработки ферментным препаратом Rovabio Excel AP**

Пятая глава посвящена выделению и идентификации продуцента белка на послеспиртовой барде. Предварительное ферментативное расщепление полисахаридных компонентов с обогащением барды легкоассимилируемыми углеводами открывает возможность целенаправленного культивирования специально отобранных штаммов анаэробных микроорганизмов с накоплением биомассы на стадии преацидификации барды для получения высокобелкового кормового продукта.

Для минимизации затрат на производство кормового продукта продуцент белка должен отвечать следующим требованиям:

- накапливать биомассу в условиях ограниченного доступа кислорода при величине рН 4,2-4,5;
- иметь высокую удельную скорость роста при повышенной температуре (40-42 °С), ограничивающей развитие посторонних микроорганизмов;
- обладать конкурентоспособностью в присутствии кислотогенных микроорганизмов, развивающихся в условиях преацидификации барды.

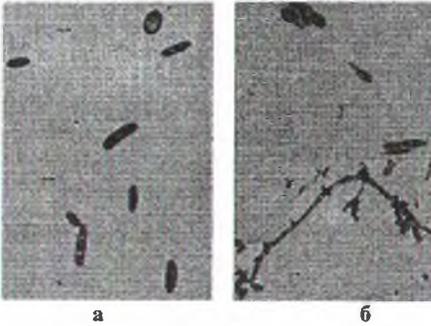
Естественной средой обитания для таких микроорганизмов является ферментализованная преацидифицированная при 42 °С барда.

Отбор штаммов продуцентов белка производили высевом преацидифицированной барды на питательные среды сусло-агар и питательный агар с последующим инкубированием (42 °С, 48 ч). Многократными пересевами на специально подобранные среды смешанного состава, на которых формируют колонии как дрожжевые, так и бактериальные клетки были получены чистые культуры, из числа которых отобран быстрорастущий факультативно анаэробный штамм, отнесенный по микро- и макроморфологическим признакам к дрожжам.

Клетки выделенного штамма удлинённые или вытянутые (рис. 4а), имеют размер 2,5-5 мкм в ширину и 3-7,5 мкм в длину, размножаются вегетативно путем многостороннего почкования. Исследуемый штамм образует аскоспоры круглой формы от 1 до 4 в аске, формирует дифференцированный ложный мицелий (псев-

домицелий), состоящий из длинных клеток псевдогрибов и окружающих их клеток округлой формы – бластоспор (рис. 4б).

На плотной среде наблюдается рост в виде складчатого штриха с ворсинчатым окаймлением. Индивидуальные колонии – белые, матовые, диаметром 1-2 мм. При росте в жидкой среде культура образует хлопьевидный осадок и пристеночное кольцо. По способности к сбраживанию сахаров данный штамм относится к небродящим.



а - форма клеток  
б - способ вегетативного размножения и образование ложного мицелия

Рисунок 4 – микроморфологические признаки выделенного штамма

На основании установленных признаков с помощью Международного банка данных МусоBank, где размещена информация о вновь выделенных штаммах грибов, а также справочных данных, установлено, что штамм дрожжей соответствует виду *Lachancea fermentati*. Дрожжи рода *Lachancea* не обладают патогенностью.

Экспериментально установлено, что при культивировании на фугате ферментированной барды (42 °С, отсутствие аэрации) в течение 24 ч культура накапливает биомассу в количестве 0,5 г/дм<sup>3</sup> по абсолютно сухому веществу (рис. 5). Максимальная удельная скорость роста составила 0,12 ч<sup>-1</sup>.

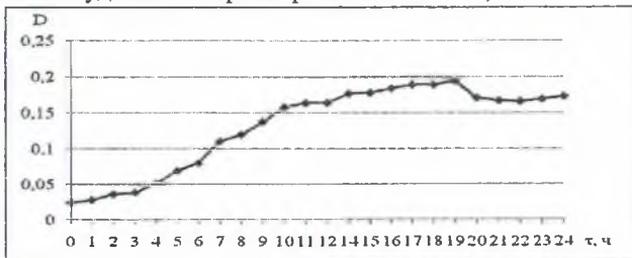


Рисунок 5 – Кривая роста популяции дрожжей *Lachancea fermentati* на фугате послеспиртовой ферментированной барде (42 °С, отсутствие аэрации).

По технологическим характеристикам выделенный штамм дрожжей является перспективным для обогащения барды белком в процессе ее преацидификации.

**Шестая глава** посвящена моделированию процессов комплексной переработки послеспиртовой барды. Результаты проведенных исследований позволяют сформировать комплексную технологию переработки послеспиртовой барды включающую следующие стадии: преацидификация барды, совмещенная с анаэробной ферментативно-микробиологической обработкой в термофильных условиях; отделение взвешенных веществ ферментированной барды с получением кормовой белоксодержащей добавки; непрерывное анаэробное сбраживание фугата ферментированной барды в высокоэффективном UASB-реакторе; очистка сброженного фугата ультрафильтрацией.

*Анаэробная ферментативно-микробиологическая обработка барды с получением белоксодержащей кормовой добавки.* Процесс ферментативно-микробиологической обработки барды моделировали в лабораторном биореакторе периодического действия объемом 3 дм<sup>3</sup>.

В эксперименте в барду вносили ферментный препарат Rovabio excel AP в количестве 1,0 см<sup>3</sup> 1%-ного раствора на 100 см<sup>3</sup> барды (pH 4,5) и инокулировали суспензией дрожжей *Lachancea fermentati* в объеме 10 см<sup>3</sup> суточной культуры (титр 1·10<sup>8</sup> кл/см<sup>3</sup>). Инокулированную барду выдерживали при температуре 42 °С в течение 24 ч (преацидификация барды). Взвешенные вещества с дрожжевой биомассой отделяли центрифугированием (5000 g, 30 мин). Влажный осадок высушивали в сушильном шкафу при 90 °С с получением опытного образца обогащенной белком сухой барды. Параллельно для сравнения получили образец сухой барды отделением взвешенных веществ натуральной барды центрифугированием с последующей сушкой при 90 °С.

Качественные показатели образцов продуктов представлены в табл. 4. Как следует из полученных данных, опытный образец обогащенной белком сухой барды имеет более высокие потребительские свойства в сравнении с сухой бардой.

Таблица 4 - Качественные показатели опытного образца белоксодержащего кормового продукта.

Показатель	Величина показателя, % от СВ	
	Опытный образец	Сухая барда
Сырой протеин	34,9±0,9	32,3±1,2
Истинный белок	30,5±1,1	20,8±0,8
Перевариваемый белок	25,4±1,3	16,9±0,9
Минеральные вещества	6,4±0,5	8,9±0,5
Клетчатка	9,5±0,6	14,8±0,5

На основании проведенных исследований разработан проект ТУ на кормовую добавку «Обогащенная белком сухая барда».

Образец обогащенной белком сухой барды был передан для независимой физико-химической и биолого-токсикологической экспертизы в НИИ прикладной ветеринарной медицины и биотехнологии при Витебской академии ветеринарной медицины. Результаты экспертизы коррелируют с полученными экспериментальными данными и подтверждают высокое содержания белка в продукте и отсутствие токсичности.

Анаэробное сбраживание фугата ферментированной барды в высокоэффективном UASB-реакторе. Освобождение преацидифицированной барды от взвешенных веществ обеспечивает возможность анаэробного сбраживания фугата с получением биогаза в высокопроизводительном UASB-реакторе. Непрерывный процесс сбраживания фугата при температуре 50 °С моделировали в лабораторном UASB-реакторе объемом 9 дм<sup>3</sup>.

В течение 4,5 месяцев функционирования UASB-реактора накапливалась биомасса метаногенных бактерий. После этого были сняты характеристики непрерывного процесса анаэробной переработки фугата барды (табл. 5).

Таблица 5 - Технологические параметры непрерывного процесса сбраживания фугата барды в UASB-реакторе

Режим сбраживания фугата			Сухие вещества фугата, г/дм <sup>3</sup>		Степень биотрансформации сухих веществ, %	Показатель ХПК фугата, мг/дм <sup>3</sup>		Степень биотрансформации компонентов по ХПК, %	Биогаз		
скорость протока, сут	время удержания в биореакторе, сут	температура, °С	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	9,5	36000	14000	61,1	9,0	59
по истечении 6 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	13,1	56,4	35000	10500	70,0	9,8	61

В целом UASB-реактор функционировал в течение 6-ти месяцев с последовательным увеличением удельной производительности по трансформируемым сухим веществам. Высокие показатели процесса генерации биогаза достигнуты при времени удерживания фугата в аппарате 17 сут (табл. 5). Дальнейшее увеличение скорости протока среды с уменьшением времени удержания до 7,4 сут привело к снижению эффективности процесса, что связано с перегрузкой биореактора по органическим веществам.

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

Анализ состава биогаза, образовавшегося в UASB-реакторе, показал, что содержание метана составляет 59-65 %, диоксида углерода - 28-35 %.

Ультрафильтрационная очистка сброженного фугата ферментированной барды. Уровень загрязненности сброженного фугата барды не позволяет осуществить сброс его на городские очистные сооружения. Для очистки сброженного

фугата наиболее приемлемы мембранные технологии, отличающиеся низким энергопотреблением.

Ультрафильтрационную очистку сброженного и осветленного отсаиванием фугата осуществляли в периодическом режиме в мембранной ячейке с площадью фильтрования 0,001075 м<sup>2</sup> при избыточном давлении 0,3 МПа. В экспериментах использовали по 50 см<sup>3</sup> сброженного фугата (рН=7,0-7,5), из которых получали 42 см<sup>3</sup> фильтрата.

Результаты экспериментов (табл. 6) показали, что сброженный фугат может быть очищен ультрафильтрацией до уровня загрязненности по ХПК меньше 1000 мг/дм<sup>3</sup>, что позволяет осуществить сброс его на городские очистные сооружения. Удельная производительность мембран колеблется в пределах 18-25 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч).

Лучшее сочетание показателей по эффективности очистки сброженного раствора и удельной производительности имеет мембрана ПАН-50.

Таблица 6 - Эффективность ультрафильтрационной очистки сброженного фугата барды на мембранах различных типов (P=0,3 МПа, рН=7,0-7,5)

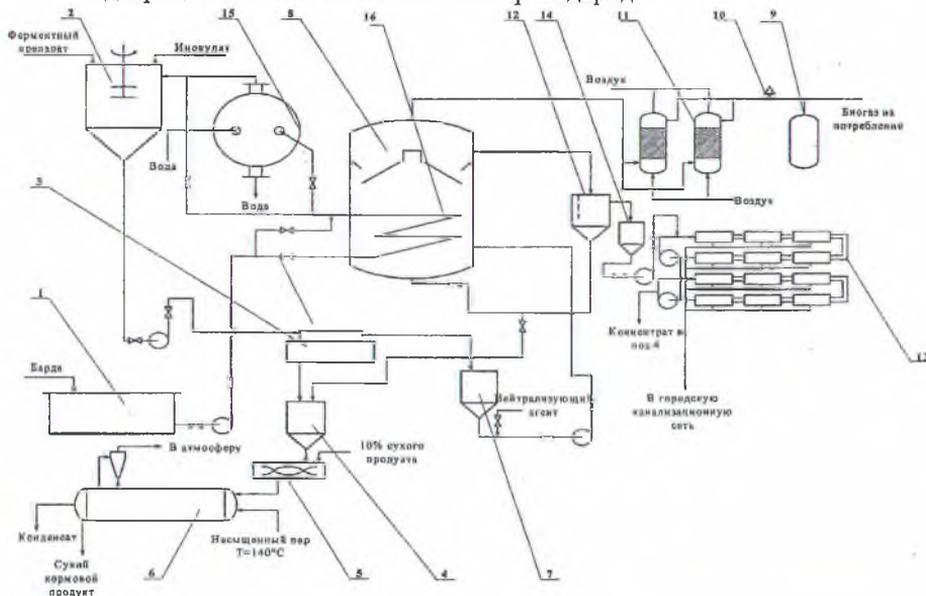
Тип мембраны	Размер пор, мкм	ХПК сброженного фугата, мг/дм <sup>3</sup>		Продолжительность фильтрования, мин	Пропускная способность мембраны, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч)	Степень очистки по ХПК, %
		исходного	после очистки ультрафильтрацией			
ПА	0,1	1800	560	130	18,0	68,9
ПАН-50	50	1800	840	110	21,3	53,3
ПАН-100	100	1800	1020	100	23,4	43,3
Фторлон	3	1800	920	95	24,7	48,9
ПС-300	300	1800	840	125	18,8	53,3

По результатам выполненных исследований разработана технология комплексной переработки послеспиртовой барды, которая основывается на следующих экспериментально обоснованных технологических решениях:

- ферментативная обработка барды с целью расщепления полисахаридов (прежде всего клетчатки);
- культивирование термотолерантного (42 °С) факультативно анаэробного микроорганизма – продуцента белка на ферментативно обработанной барде;
- анаэробная переработка барды с разделением процесса на две стадии, реализуемые в отдельных аппаратах: преацидификация подготовленной барды при температуре 42 °С и сбрасывание фугата преацидифицированной барды с биотрансформацией растворенных веществ в биогаз;
- совмещение процесса преацидификации барды с ферментативной обработкой и целенаправленным культивированием продуцента белка с последующим отделением обогащенных протеином взвешенных веществ центрифугированием для получения белоксодержащего кормового продукта;
- очистка сброженного фугата барды ультрафильтрацией.

Разработанная технология комплексной переработки послеспиртовой барды (рис. 6) включает следующие технологические стадии:

- преацидификация барды в присутствии гидролитических ферментов, расщепляющих полисахаридные компоненты, с одновременным культивированием факультативно анаэробного термотолерантного штамма - продуцента белка;
- разделение фаз преацидифицированной барды центрифугированием с получением кека и фугата;
- сушка кека в роторно-дисковой сушилке с получением белоксодержащего кормового продукта;
- анаэробное сбраживание фугата в UASB-реакторе с получением биогаза;
- очистка осветленного сброженного фугата ультрафильтрацией;
- адсорбционная очистка биогаза от сероводорода.



1 – приемник барды; 2 – преацидификатор; 3 – декантерная центрифуга; 4 – сборник кека; 5 – шнек-смеситель; 6 – роторно-дисковая сушилка; 7 – сборник фугата; 8 – UASB-реактор; 9 – сухой газгольдер; 10 – факельная установка; 11 – адсорбер для удаления  $H_2S$ ; 12 – отстойник; 13 – ультрафильтрационный модуль; 14 – сборник осветленного сброженного фугата; 15 – спиральный теплообменник; 16 – трубчатый теплоутилизатор

**Рисунок 6 - Технологическая схема процесса комплексной переработки послеспиртовой барды**

Разработанная технология микробиологической переработки послеспиртовой барды позволяет получить из 1 т отхода 50-55 кг сухого белоксодержащего кормового продукта и 13-14 м<sup>3</sup> биогаза.

В приложениях приведены статистическая обработка данных, справки о практическом использовании результатов диссертационных исследований в проектировании биогазовых установок, проект ТУ на обогащенную белком

сыхую барду, проект опытно-промышленного регламента на технологию, технико-экономические параметры разработанной технологии, результаты химико-биологической и биолого-токсикологической экспертизы кормового продукта, акт внедрения в учебный процесс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Исследованы закономерности генерации биогаза при анаэробной переработке послеспиртовой барды и ее жидкой части - фугата. Показано, что присутствие взвешенных веществ (в частности клетчатки) снижает степень биотрансформации органических компонентов в биогаз в 1,3 раза в сравнении с фугатом барды, что обуславливает целесообразность отдельной переработки твердой и жидкой частей барды с получением кормовой добавки и биогаза [2, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 12].

2. Впервые установлены закономерности и разработан способ предварительной ферментативно-микробиологической обработки барды, включающий воздействие гидролитическими ферментами, расщепляющими трудноутилизуемый полисахарид - клетчатку на 40 % с увеличением общей концентрации РВ с 0,27 до 1,5 % и культивирование на ферментированной барде в качестве продуцента белка вновь выделенного факультативно анаэробного термотолерантного штамма дрожжей *Lachancea fermentati* с получением обогащенного белком кормового продукта, содержащего не менее 30 % истинного протеина [2, 3, 7, 8, 9, 12].

3. В результате моделирования процесса установлены технологические параметры непрерывного анаэробного сбраживания фугата барды в высокоэффективном UASB-реакторе, обеспечивающие выход биогаза 14 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> фугата и снижение уровня загрязненности сбраживаемого фугата на 89% по показателю ХПК [2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12].

4. Впервые исследован процесс ультрафильтрационной очистки сброженно-го фугата. Показана возможность снижения его загрязненности по показателю ХПК до уровня 600-800 мг/дм<sup>3</sup>, позволяющего осуществить сброс на городские очистные сооружения [4, 5].

5. Разработана технология комплексной ферментативно-микробиологической переработки послеспиртовой барды, обеспечивающая получение из 1 т отхода 50-55 кг обогащенной белком кормовой добавки и 14 м<sup>3</sup> биогаза. Рассчитаны технико-экономические показатели разработанного технологического процесса для спиртового завода КПП «Полесье». При инвестициях в 2,9-3,0 млн. евро срок окупаемости производства составляет 5 лет. Разработан опытно-промышленный регламент переработки послеспиртовой барды и технические условия на кормовой продукт «Обогащенная белком сухая барда» [4, 5, 7, 8, 9, 12, 13].

## Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная технология комплексной переработки послеспиртовой барды предназначена для использования на предприятиях спиртовой промышленности как на территории Беларуси, так и за ее пределами.

Практическая реализация технологии позволит:

- утилизировать крупнотоннажный обременительный отход производства этанола и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду;
- производить белоксодержащую кормовую добавку с высокими потребительскими свойствами, заменяющую аналогичные кормовые продукты, закупаемые по импорту;
- получить газообразный энергоноситель (биогаз), который может использоваться для получения как тепловой, так и электрической энергии, что снижает зависимость предприятия от цен на энергоносители;
- повысить рентабельность спиртового производства за счет глубокой переработки пищевого сырья с получением коммерчески ценных продуктов.

Произведенные технико-экономические расчеты показали, что требуемые инвестиции на строительство цеха по переработке барды для спиртзавода мощностью по этанолу 2000 дал/сут составляет 2,9-3,0 млн. евро. Срок окупаемости инвестиций 5 лет. Достоверность экономических расчетов подтверждена независимой энергетической компанией «Энека».

Результаты диссертационной работы в виде опытно-промышленного регламента используются при проектировании промышленных биогазовых установок по переработке барды организациями ЗАО «ДиАрКласс» (справка от 05.08.2010 №515), ООО «Биотехстрой» (акт от 6.10.2011 г.), ООО «Биогазпро» (акт от 15.10.2012 №45).

Результаты научных исследований и технология комплексной переработки послеспиртовой барды внедрены в курсовое и дипломное проектирование для студентов IV-V курса спец. «Биотехнология» и «Биоэкология», в лекционный курс и лабораторный практикум по дисциплине «Промышленная биотехнология» для студентов V курса спец. «Биотехнология», в лекционный курс по дисциплине «Экологическая биотехнология» для студентов IV курса по спец. «Биоэкология».

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Анализ мирового опыта в технологии переработки послеспиртовой барды // Труды БГТУ. Сер. 4, Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2010 – Вып. 18. – С.294-301.
2. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С., Лембович А.И., Сазановец М.А. Изменение состава послеспиртовой барды при анаэробной и ферментативной обработке // Труды БГТУ. Сер. 4, Химия, технология органических веществ и биотехнология. – 2011 – Вып.19. – с.185-189.
3. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С., Лембович А.И. Исследование процесса анаэробной переработки послеспиртовой барды. // Материалы, технологии, инструменты. Т. 16. – 2011 – №2. – с. 85-89.
4. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Получение белоксодержащей кормовой добавки при комплексной переработке послеспиртовой барды // Сборник научных трудов ГГАУ «Сельское хозяйство – проблемы и перспективы». - Ч.1. – 2012. – В печати.
5. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С., Лембович А.И., Сазановец М.А. Технология переработки послеспиртовой барды с получением кормового продукта и биогаза // Весні НАН Беларусі. Сер. Фіз-тэхн. навук. - 2012. - №4. - В печати.

### Материалы конференций

6. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Анаэробная переработка послеспиртовой барды с получением биогаза // Материалы 8-й международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии, г. Гродно. – 2010 – ч.1. – С. 198-205.
7. Кузнецов И.Н., Сазановец М.А., Лембович А.И., Ручай Н.С. Получение кормового белоксодержащего продукта на основе отхода производства этанола – послеспиртовой барды // Материалы международной научно-технической конференции «Техника и технология защиты окружающей среды», г. Минск. – 2011. – с. 45-48.
8. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С., Сазановец М.А., Лембович А.И. Технология комплексной переработки послеспиртовой барды с получением кормового продукта и биогаза // Материалы международной научно-технической конференции «Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления», г. Минск. – 2011. – с. 136-140.
9. Кузнецов И.Н. Комплексная технология переработки послеспиртовой барды с получением биогаза // Материалы встречи молодых ученых «Молодежные идеи и проекты» в рамках 1-го Форума Союзного государства ВУЗов инженерно-технологического профиля, г. Минск. – 2012. – С. 16-17.

### Тезисы докладов

10. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Анаэробная переработка послеспиртовой барды с получением биогаза // Тезисы международной научной конференции «Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан–2030» (Сагиновские чтения №2), г. Караганда. – 2010. -. С.195-196.

11. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С. Анаэробная переработка послеспиртовой барды с получением биогаза // Тезисы 8-й международной научно-технической конференции «Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии, г. Гродно. – 2010 – ч.1. – С. 198-205.

12. Ива Kuznetsov. "The technology of complex processing of stillage with biogas production" // Belarus-Korea science and technology seminar, Minsk. – 2011. –р. 29.

13. Кузнецов И.Н., Ручай Н.С., Агей О.В. Переработка послеспиртовой барды и осадков сточных вод с получением биогаза // Тезисы международной конференции «Россия-Беларусь-Сколково:единое инновационное пространство», г. Минск. – 2012. – С. 349-350.



## РЭЗЮМЭ

Кузняцоў Ілья Мікалаевіч

### Комплексная перапрацоўка пасляспіртавой барды з атрыманнем бялокзмяшчальнага кармавага прадукту і біягазу

**Ключавыя словы:** адход вытворчасці этанолу – пасляспіртавая барда, ферментатыўна-мікробіялагічная апрацоўка, прадукцэнт бялку, узбагачаная бялком сухая барда, фугат барды, анаэробнае зброджванне фугату ў UASB-рэактары, біягаз, ультрафільтрацыйная ачыстка зброджанага раствору, тэхналогія комплекснай перапрацоўкі барды.

**Мэта даследавання:** стварэнне рацыянальнай тэхналогіі комплекснай перапрацоўкі пасляспіртавой барды з атрыманнем бялокзмяшчальнага кармавага прадукту і біягазу.

**Метады даследавання:** фізіка-хімічныя, мікробіялагічныя, біяхімічныя, храматаграфічныя, тэрмагравіметрычны і спектральны метады аналізу, мадэліраванне тэхналагічных працэсаў ферментатыўна-мікробіялагічнай перапрацоўкі барды на лабараторных устаноўках.

**Атрыманьня вынікі і іх навiзна:** даследаваны заканамернасці генерацыі біягазу пры анаэробнай перапрацоўцы барды і яе вадкай часткі – фугату і паказана мэтазгоднасць паасобнай перапрацоўкі пвёрдай і вадкай частак барды з атрыманнем кармавой дабаўкі і біягазу; упершыню ўсталяваны заканамернасці і распрацаваны спосаб папярэдняй ферментатыўна-мікробіялагічнай апрацоўкі барды, які ўключае ўздзеянне гiдралітычнымi ферментамi, якія распічапляюць цяжкаўтылізуемы поліцукрыд клятчатка, культываванне на ферментаванай бардзе ў якасці прадукцэнта бялку дрожджаў *Lachancea fermentati* з атрыманнем багатага бялком кармавага прадукту, які змяшчае не менш як 30% сапраўднага бялку, у выніку мадэлявання працэсу ўсталяваны тэхналагічныя параметры працэсу бесперапыннага анаэробнага зброджвання фугату барды ў UASB-рэактары; упершыню даследаваны працэс ультрафільтрацыйнай ачысткі зброджанага раствору і паказана магчымасць зніжэння яго забруджвання па параметры ХСК да ўзроўню, які дае магчымасць скідаць на ачыстныя збудаванні; упершыню распрацавана тэхналогія комплекснай перапрацоўкі пасляспіртавой барды, якая забяспечвае атрыманне з 1 т 50-55 кг узбагачанай бялком кармавой дабаўкі і 14 м<sup>3</sup> біягазу.

**Ступень выкарыстання (рэкамендацыі):** Тэхналогія комплекснай перапрацоўкі пасляспіртавой барды прызначана для выкарыстання на заводах па атрыманні этанолу. Распрацаваная тэхналогія ў выглядзе вопытна-прамысловага рэгламенту прынята для практычнага выкарыстання ў праектаванні ўстановак па перапрацоўцы пасляспіртавой барды СТАА «Малінаўшчызенскі спіртаводачны завод – «Аквадыў» (Аграфірма «Лебедзева» (в. Лабачоўка, Маладзечанскі раён)), а таксама ў якасці тэхніка-камершыйнай прапановы даслана ў тэндэрную камісію АСП «Парэчанскі спіртавы завод» (в. Парэчча, Гродзенская вобласць).

## РЕЗЮМЕ

Кузнецов Илья Николаевич

### Комплексная переработка послеспиртовой барды с получением белоксодержащего кормового продукта и биогаза

**Ключевые слова:** отход производства этанола - послеспиртовая барда, ферментативно-микробиологическая обработка барды, продуцент белка, обогащенная белком сухая барда, фугат барды, анаэробное сбраживание фугата в UASB-реакторе, биогаз, ультрафильтрационная очистка сброженного раствора, технология комплексной переработки барды.

**Цель работы:** создание рациональной технологии комплексной переработки послеспиртовой барды с получением белоксодержащего кормового продукта и биогаза.

**Методы исследования:** физико-химические, микробиологические, биохимические, хроматографический, термогравиметрический и спектрофотометрический методы анализа; моделирование технологических процессов ферментативно-микробиологической переработки барды на лабораторных установках.

**Полученные результаты и их новизна:** Исследованы закономерности генерации биогаза при анаэробной переработке барды и ее жидкой части - фугата и показана целесообразность отдельной переработки твердой и жидкой частей барды с получением кормовой добавки и биогаза; впервые установлены закономерности и разработан способ предварительной ферментативно-микробиологической обработки барды, включающий воздействие гидролитическими ферментами, расщепляющими трудноутилизуемый полисахарид клетчатку, культивирование на ферментированной барде в качестве продуцента белка дрожжей *Lachancea fermentati* с получением обогащенного белком кормового продукта, содержащего не менее 30% истинного белка; в результате моделирования процесса установлены технологические параметры непрерывного анаэробно сбраживания фугата барды в UASB-реакторе; впервые исследован процесс ультрафильтрационной очистки сброженного раствора, показана возможность снижения его загрязненности по показателю ХПК до уровня, позволяющего осуществить сброс на городские очистные сооружения; впервые разработана технология комплексной переработки послеспиртовой барды, обеспечивающая получение из 1 т 50-55 кг обогащенной белком кормовой добавки и 14 м<sup>3</sup> биогаза.

**Степень использования (рекомендации):** Технология комплексной переработки послеспиртовой барды предназначена для использования на заводах по производству этанола. Разработанная технология в виде опытно-промышленного регламента принята для практического использования в проектировании установок по переработке послеспиртовой барды ООО «Малиновіцкіненскі спиртводочны завод - «Аквадів» на Агрофирме «Лебедево» (д. Лобачевка, Молодечненский район), а также в качестве технико-коммерческого предложения направлена в тендерную комиссию ОСП «Поречский спиртовый завод» (д. Поречье, Гродненской области).

## SUMMARY

Kuznetsov Ilya Nikolaevich

### Complex Processing of Stillage with Protein Containing Feed Additive and Biogas Production

**Keywords:** a waste of ethanol production – stillage, enzymatic-microbiological treatment of stillage, protein producer, protein enriched dry stillage, thin stillage, anaerobic fermentation of thin stillage in UASB-reactor, biogas, ultrafiltration treatment of fermented liquid, a technology of complex processing of stillage.

**Objective:** the design of rational technology of complex processing of stillagee with protein containing feed additive and biogas production.

**Research methods:** physical and chemical, microbiological, biochemical, chromatographic, thermogravimetric and spectral methods of analysis, modeling of technological processes of enzymatic-microbiological treatment of stillage on laboratory equipment.

**Results obtained and their novelty:** Regularities of biogas generation in anaerobic treatment of stillage and thin stillage was developed, and reviewed practicability of separated processing of thin stillage and solids with feed additive and biogas receiving; first established regularities and design the method of enzymatic-microbiological pretreatment of stillage which include undergoing it by hydrolytic enzymes which split cellulose, cultivation on fermented stillage in case of protein producer yeasts *Lachancea fermentati* with enriched by protein feed additive containing more than 30% of true protein; established technological parameters of continuous anaerobic treatment of thin stillage in UASB-reactor by laboratory modeling; first developed the process of fermented liquid treatment by ultrafiltration treatment and introduced the possibility of decrease their pollution on COD to level enough to drop on municipal wastewater treatment plant, designed the complex technology of stillage processing with production of 50-55 kg of enriched by protein feed additive and 14 m<sup>3</sup> of biogas from 1 ton of stillage.

**Level of using (recommendations):** The technology of complex processing of stillage is for using in bioethanol plants. Designed technology in form of pilot rules adopted for practical use in engineering of plant for stillage processing of stillage from ethanol plant “Akvadiv” on farm “Lebedevo” (village Lobachevka, Molodechno region) and on form of technical-commercial proposal directed to tender commission to Porechie ethanol plant (village Porechie, Grodno region).

Научное издание

**Кузнецов**  
Илья Николаевич

**КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПОСЛЕСПИРТОВОЙ БАРДЫ  
С ПОЛУЧЕНИЕМ БЕЛОКСОДЕРЖАЩЕЙ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ  
И БИОГАЗА**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 03.01.06 – биотехнология (в том числе бионанотехнологии)

Ответственный за выпуск И.Н. Кузнецов

Подписано в печать 26.11.2012. Формат 60х84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,8.  
Тираж 75. Заказ 500.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.  
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.  
Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.