

УДК 663.551

А. И. Лембович, аспирант (БГТУ);
Н. С. Ручай, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
И. Н. Кузнецов, младший научный сотрудник (БГТУ);
А. Ф. Ильюшенко, доктор технических наук, профессор,
 член-корреспондент НАН Беларуси (ИПМ НАН Беларуси);
Р. А. Кусин, кандидат технических наук,
 ведущий научный сотрудник (ИПМ НАН Беларуси);
И. Н. Черняк, заведующий лабораторией, сотрудник (ИПМ НАН Беларуси);
Н. Н. Якимович, кандидат технических наук (ИФОХ НАН Беларуси)

КОНЦЕПЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СБРАЖИВАНИЯ СУСЛА В ПРОИЗВОДСТВЕ ЭТАНОЛА ИЗ КРАХМАЛСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Обоснована концепция непрерывного сбраживания суслу в биореакторе, оснащенный микрофилтративным модулем, обеспечивающим разделение бражки с отбором фильтрата (водно-спиртового раствора) и возвратом концентрата дрожжей в бродильный аппарат. Показана высокая эффективность функционирования опытных образцов микрофилтративных элементов, изготовленных из прессованного порошка титана, со средним размером пор от 2 до 7 мкм.

Экспериментальным путем при разделении водной суспензии спиртообразующих дрожжей определена пропускная способность микрофилтративных элементов по водно-спиртовому раствору, составляющая $700\text{--}1000 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{ч}$ при полном отделении дрожжевых клеток.

The concept of a continuous fermentation of a mash in the bioreactor equipped with the microfiltration module, ensuring separation of brew with filtrate takeoff (an aqueous-alcoholic solute) and backstock of a concentrate of yeast to the barmy device is offered. Efficiency of functioning of pre-production models of the microfiltration elements designed of pressed titan powder with the average pore size from 2 to 7 micron is introduced.

Throughput of filter cartridges on an aqueous-alcoholic solute on modelling system is experimentally defined and was $700\text{--}1,000 \text{ dm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{hour}$ at absolute efficiency of keeping of yeast cells.

Введение. В отечественной и мировой практике производства этанола на протяжении многих лет широко используется периодический способ сбраживания суслу спиртообразующими дрожжами. Этот способ имеет ряд труднопреодолимых недостатков: низкая производительность бродильных аппаратов; большие затраты времени и тепловой энергии на межцикловые операции по подготовке аппарата к работе; нестабильное физиологическое состояние популяции дрожжей, изменяющиеся в процессе брожения от начального периода с избытком субстрата до времени его полного исчерпания; сложность борьбы с инфекцией, особенно в начальный период брожения, когда субстрат в избытке, а концентрация дрожжей невысокая; необходимость накопления биомассы засевных дрожжей для инокулирования суслу в каждом производственном цикле; сложность автоматизации процесса.

Не позволяет избавиться от указанных недостатков непрерывно-циклический режим сбраживания суслу, который реализуют в громоздкой батарее из восьми бродильных аппаратов.

В современных условиях актуальной задачей является разработка технологического процесса непрерывного сбраживания суслу в бродильном аппарате, обеспечивающем удержание клеток дрожжей (продуцентов этанола) в фер-

ментационном объеме. Решение этой задачи возможно при использовании биореакторов с иммобилизованными клетками дрожжей или мембранных биореакторов, оснащенных мембранным модулем для непрерывного отбора бесклеточной спиртовой бражки.

В настоящее время в мировой практике получают распространение технологии мембранного разделения компонентов биосистем (МБР-технологии), которые могут быть применены и в производстве этанола для удержания биомассы дрожжей в ферментационной среде с одновременным отбором водно-спиртового раствора. Мембранные методы отличаются высокой эффективностью разделения сложных систем, низкими энергетическими затратами, универсальностью использования.

Современные технологии МБР представляют собой реализуемые сочетания различных мембранных и биохимических процессов. Известно уже более 30 компаний, которые производят мембранные элементы и модули для технологии МБР, наиболее крупными из которых являются: GE WATER & PROCESS Technologies, Siemens Water Technologies, США; Kubota, Mitsubishi-Rayon, Toray Industries Inc., Япония [1].

По состоянию на 2008 г. в мире эксплуатируется более 2200 МБР-установок различной производительности, из них более 75% – это

установки для очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод. В настоящее время в Европе ежегодно вводится в эксплуатацию около 70 новых МБР-установок [1].

По конфигурации системы МБР могут быть классифицированы на две основные группы:

– циркуляционные МБР, которые включают рециркуляцию разделяемой смеси через мембранный модуль, расположенный вне биореактора;

– погружные МБР, в которых мембранный блок размещен внутри биореактора (широко применяются в процессах биологической очистки сточных вод).

Движущая сила фильтрации через микрофильтрационные мембраны обеспечивается либо давлением в герметичном биореакторе, либо созданием разрежения на стороне пермеата.

В США разработан высокопроизводительный процесс сбраживания суслу в биореакторе непрерывного действия, оснащенный синтетической мембраной для задержания и возврата биомассы дрожжей в аппарат, с одновременным непрерывным отводом этанола [2].

Преимуществом данной технологии является непрерывное отделение и возврат дрожжей в биореактор, что снижает затраты на накопление биомассы засевных дрожжей и сокращает цикл брожения. Возврат дрожжей в бродильный аппарат позволяет создать высокую плотность клеток в ферментационной среде и увеличить производительность аппарата по сбраживаемому суслу.

Непрерывное удаление этанола из ферментационной среды создает возможность проведения процесса брожения с таким содержанием этанола, которое активирует дрожжи. Бесклеточная бражка содержит небольшое количество взвешенных веществ, что способствует снижению стоимости процессов очистки спирта.

В мембранных биореакторах используются полупроницаемые разделяющие элементы различных типов и конфигураций: трубчатые, спиральные, дисковые, плоскосторонние, половолоконные мембранные элементы, органические (полиамид, фторопласт и др.), металлические и неорганические (керамические) микрофильтрационные и ультрафильтрационные мембраны.

Трубчатые мембранные модули конструктивно аналогичны трубчатым теплообменным аппаратам, что обуславливает достаточно низкую плотность упаковки, но минимальную склонность к загрязнению, а также возможность регенерации или замены мембран. Модули данного типа применяются как в режиме напорной, так и погружной микрофильтрации.

Цель настоящей работы – обоснование технологического процесса непрерывного сбражи-

вания суслу в бродильном аппарате, оснащенном микрофильтрационным модулем.

Основная часть. Исходя из требований, предъявляемых к мембранам (селективность, пропускная способность, механическая прочность, устойчивость к действию среды разделяемой системы, доступность), в промышленных процессах предпочтительно использование трубчатых микрофильтрационных элементов из прессованных порошков металлов, изготовление которых освоено в Республике Беларусь.

Опытный образец микрофильтрационного модуля для разделения суспензии спиртообразующих дрожжей изготовлен в ГНУ «Институт порошковой металлургии НАН Беларуси». Основой модуля является цилиндрический фильтрующий элемент с заданным размером пор (4–30 мкм), изготовленный прессованием порошкообразных материалов – титана или нержавеющей стали (рис. 1). Внутри элемента помещен монолитный конус из нержавеющей стали. Элемент заключен в цилиндрический кожух. Конус предназначен для обеспечения высокой линейной скорости движения суспензии у фильтрующей поверхности, что способствует уменьшению количества отлагающейся на поверхности фильтрующего элемента дрожжевой массы.

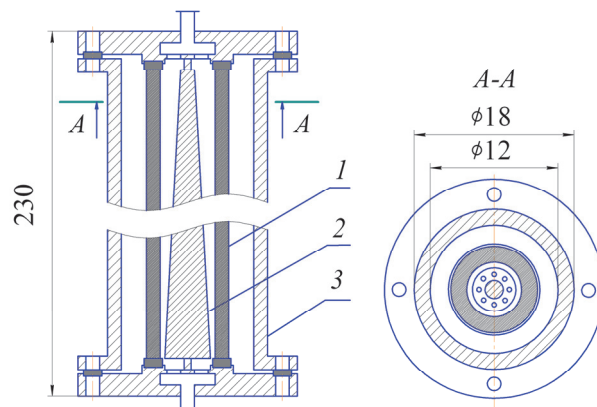


Рис. 1. Микрофильтрационный модуль:
1 – фильтрующий элемент;
2 – конус; 3 – корпус

Рабочая длина опытного образца цилиндрического фильтрующего элемента – 230 мм, внутренний диаметр – 12 мм, наружный диаметр – 18 мм, внутренняя фильтрующая поверхность – 0,0087 м².

Исследование эффективности функционирования микрофильтрационного модуля проводили на лабораторной установке (рис. 2), обеспечивающей регулируемый проток дрожжевой суспензии через модуль. В экспериментах использовали модельную водную суспензию

спиртообразующих дрожжей и производственное сусло ОАО «Бобруйский завод биотехнологий».

В качестве модельной среды для определения пропускной способности и эффективности функционирования микрофльтрационных элементов была использована суспензия спиртообразующих дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* с концентрацией 20 г/дм³ (по биомассе 75%-ной влажности). Модельная суспензия дрожжей из биореактора пережимом сжатым азотом подается на микрофльтрационный модуль, где разделяется на два потока – концентрат и фильтрат. Концентрат возвращается в биореактор. Эффективность отделения дрожжевых клеток в микрофльтрационном модуле контролировали микроскопированием проб фильтрата в препарате «раздавленная капля».

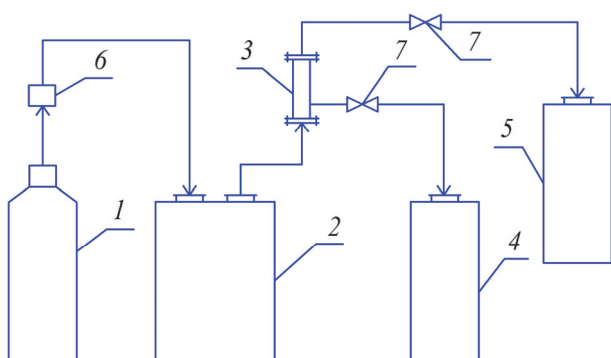


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования эффективности функционирования микрофльтрационного модуля:

- 1 – баллон со сжатым азотом; 2 – биореактор;
3 – микрофльтрационный модуль;
4 – приемник фильтрата; 5 – приемник концентрата;
6 – редуктор с регулируемым давлением газа на выходе; 7 – вентили для регулирования расходов фильтрата и циркулирующей суспензии

Давление на входе в микрофльтрационный модуль регулировали редуктором на линии по-

дачи сжатого азота в биореактор в пределах 0,1–0,3 МПа.

При расходе циркулирующей через модуль дрожжевой суспензии 2,2–3,2 дм³/мин расчетная линейная скорость движения суспензии в пространстве между внутренним конусом и поверхностью фильтрующего элемента составила 0,50–1,50 м/с.

В экспериментах через микрофльтрационный модуль пропускали от 20 до 80 дм³ дрожжевой суспензии. После каждого цикла фильтрации микрофльтрационный модуль подвергали регенерации промывкой водой под давлением 0,1–0,2 МПа в обратном направлении с расходом промывной воды 0,08–0,1 м³ на 1 м² фильтрующей поверхности. Эксперименты показали, что такая регенерация полностью восстанавливает пропускную способность микрофльтрационного модуля.

На лабораторной установке исследовали пять опытных образцов фильтрующих элементов, изготовленных из порошков титана и нержавеющей стали и имеющих размер пор от 2,2 до 30 мкм (табл. 1). Установлено, что высокой эффективностью разделения дрожжевой суспензии отличаются фильтрующие элементы из титанового порошка со средним размером пор 2,2–7,0 мкм (ТПП-8, ПТМ и ТПП-1), которые обеспечивают практически полное отделение дрожжевых клеток при скорости отбора фильтрата 800–900 дм³/м² · ч и расходе циркулирующей суспензии 3,2 дм³/мин. Микроскопирование проб фильтрата показало, что дрожжевые клетки в поле зрения микроскопа отсутствуют.

Снижение скорости циркуляции дрожжевой суспензии через микрофльтрационный модуль в 1,5 раза (с 3,2 до 2,2 дм³/мин) не оказало негативного влияния на пропускную способность фильтрующих элементов (табл. 2).

Таблица 1

Эффективность функционирования микрофльтрационного модуля при разделении модельной суспензии спиртообразующих дрожжей

Фильтрующие элементы	Материал и средний размер пор элемента, мкм	Удельная пропускная способность, дм ³ /м ² · ч	Эффективность разделения дрожжевой суспензии, %	Объем отобранного фильтрата до регенерации элемента, м ³ /м ²	Объем воды на регенерацию, м ³ /м ²
ТПП-5	Титан, 32,8	1000	10	–	–
ТПП-8	Титан, 5,8	900	100	0,15	0,10
ПТМ	Титан, 2,2	920	100	0,20	0,08
ПХ18Н15	Нержавеющая сталь, 4,9	1350	30	–	–
ТПП-1	Титан, 6,8	800	100	0,28	0,08

Таблица 2

Эффективность разделения модельной суспензии дрожжей при различной скорости циркуляции

Фильтрующие элементы	Скорость циркуляции дрожжевой суспензии, $\text{дм}^3/\text{мин}$	Удельная пропускная способность, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$	Эффективность разделения дрожжевой суспензии, %	Объем отобранного фильтрата до регенерации элемента, $\text{м}^3/\text{м}^2$	Объем воды на регенерацию, $\text{м}^3/\text{м}^2$
ТПП	2,5	700	100	0,17	0,08
ПТМ	2,2	800	100	0,21	0,08
ТПП-1	3,2	820	100	0,32	0,08

По совокупности экспериментально установленных характеристик наибольший интерес представляет титановый элемент ТПП-1, который обеспечивает наибольший отбор фильтрата без регенерации фильтрующей поверхности ($0,32 \text{ м}^3/\text{м}^2$). Дополнительные исследования показали (табл. 3), что пропускная способность элемента ТПП-1 достигает $1050 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ при сохранении высокой эффективности процесса разделения дрожжевой суспензии.

Таблица 3

Удельная производительность микрофильтрационного элемента ТПП-1 по фильтрату

Скорость отбора фильтрата, $\text{дм}^3/\text{мин}$	Пропускная способность элемента, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
0,138	950
0,144	990
0,152	1050

Непрерывный проток дрожжевой суспензии через модуль в количестве 80 дм^3 ($9,2 \text{ м}^3/\text{м}^2$ поверхности) не вызывает существенного загрязнения пор фильтрующего элемента ТПП-1 дрожжевыми клетками и снижения его пропускной способности (табл. 4).

Таблица 4

Влияние нагрузки по дрожжевой суспензии на пропускную способность микрофильтрационного элемента ТПП-1

Проток дрожжевой суспензии через модуль, $\text{м}^3/\text{м}^2$	Пропускная способность фильтрующего элемента, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$
2,3	350
4,6	405
6,9	610
9,2	550

На основании результатов исследований разработана технологическая схема опытно-промышленной установки непрерывного сбраживания сусла в производстве этанола (рис. 3).

Сусло после глубокого осахаривания в течение 2–3 ч при температуре 58°C осветляется в декантерной центрифуге (поз. 1) с получением

кека и фугата. Кек промывается горячей водой с температурой 80°C с кратностью промывки по воде 2 : 1, обезвоживается на фильтре-прессе ФПАКМ (поз. 5) до влажности твердого остатка 60% и винтовым конвейером (поз. 11) подается в роторно-дисковую сушильную установку (поз. 12) для получения кормового продукта 10%-ной влажности. Половину промывной воды направляют на приготовления замеса, другую половину направляют в сборник фугата (поз. 2). Сусло охлаждается до температуры $28\text{--}29^\circ\text{C}$ в пластинчатом теплообменнике (поз. 4) и поступает в биореактор (поз. 6).

Биореактор представляет собой бродильный аппарат, оснащенный внешним циркуляционным контуром, включающим два (рабочий и резервный) микрофильтрационных модуля (поз. 10). Процесс брожения протекает в режиме хемоста, при котором концентрация субстрата в сусле минимальна, а концентрация этанола высокая, что ограничивает развитие бактериальной инфекции. Спиртсодержащие пары из бродильных аппаратов улавливаются в спиртоловушке (поз. 7). Сброженное сусло поступает в сборник зрелой бражки (поз. 9) и затем в брагоректификационное отделение для дальнейшей переработки.

Предложенная технология имеет ряд достоинств: увеличивается выход этанола за счет сокращения объема сусла, направляемого на получение засевных дрожжей; упрощается процесс ректификации бражки, не содержащей взвешенных веществ (снижается расход пара на бражную колонну и уменьшаются затраты на чистку колонны от загрязнений); облегчается задача борьбы с инфекцией при сбраживании сусла, так как в биореакторе поддерживается минимальная концентрация субстрата и высокая концентрация биомассы спиртообразующих дрожжей и этанола, а также осуществляется непрерывный отбор бражки; возрастает производительность бродильного аппарата, функционирующего в непрерывном режиме; снижаются капитальные и эксплуатационные затраты на сбраживание сусла из-за уменьшения числа бродильных аппаратов и исключения межцикловых операций по подготовке бродильных аппаратов к работе.

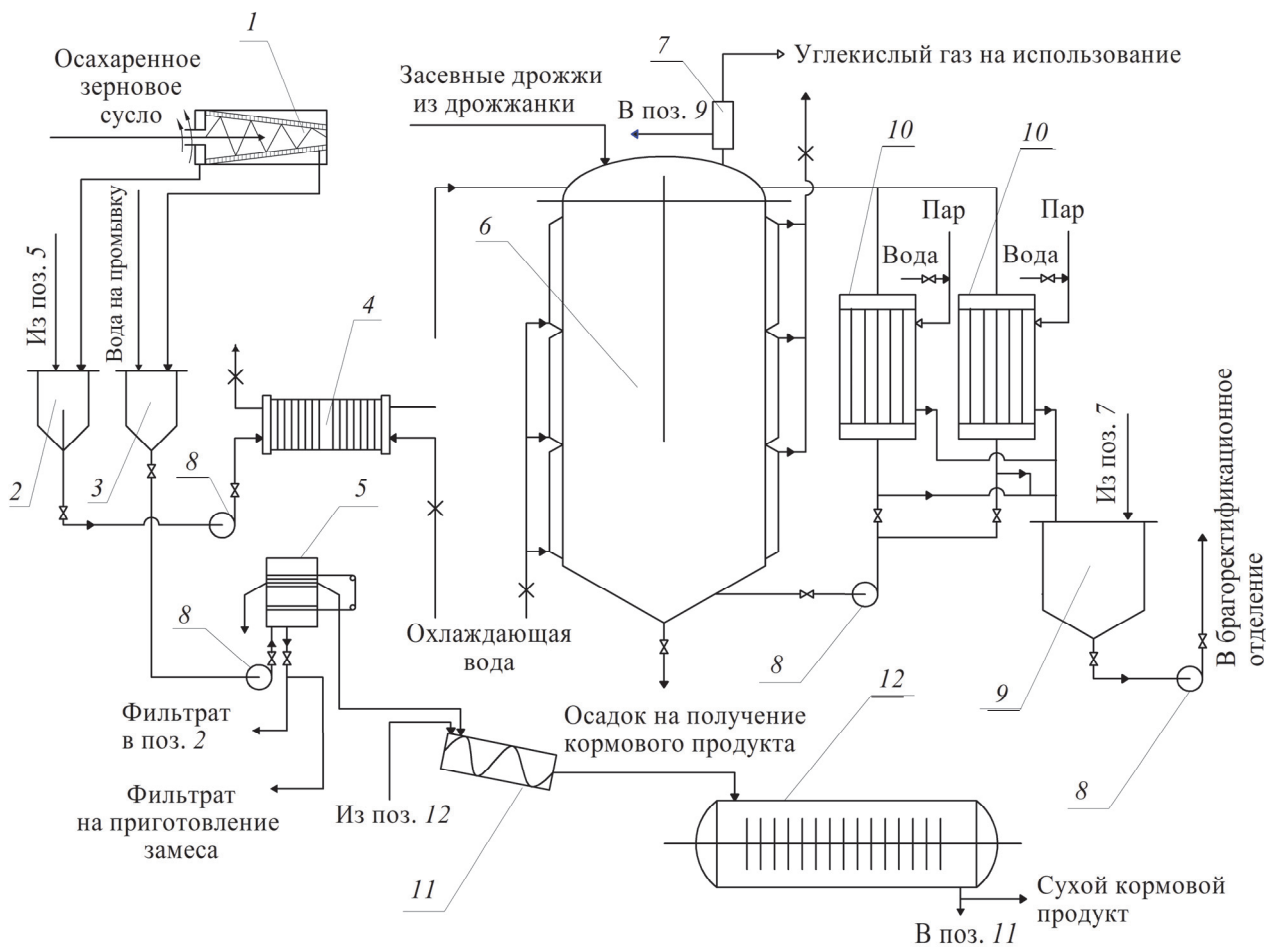


Рис. 3. Технологическая схема непрерывного сбраживания сусла в производстве этанола из крахмалсодержащего сырья.

Заключение. Экспериментально установлена высокая эффективность трубчатых микрофилтративных элементов, изготовленных прессованием порошка титана, при разделении водной суспензии спиртообразующих дрожжей. Предложена технология непрерывного сбраживания зернового сусла в биореакторе, оснащённом микрофилтративным модулем, обеспечивающим разделение бражки с отбором водно-спиртового раствора и возвратом дрожжевой массы в бродильный аппарат.

Литература

1. Козлов И. М., Агарёв А. М. Подготовка технической воды с помощью мембранных тех-

нологий для использования в городском хозяйстве // Интернет-журнал «Водные проблемы» [Электронный ресурс]. 2014. URL: <http://www.aqua-problems.ru/sci/statya/kozlov-im-agaryov-am/1> (дата обращения: 01.02.2014).

2. Escobar Jose M., Kishore D. Rane, Munir Cheryan Pilot-scale trials in a corn wet mill. Ethanol production in a bioreactor with an integrated membrane distillation module // Applied Biochemistry and Biotechnology [Electronic resource]. 2014. URL: <http://link.springer.com/article/10.1385/ABAB%3A91-93%3A1-9%3A283> (date of address: 01.02.2014).

Поступила 22.02.2014