

Бондарь С.Н.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Трубникова А.А.

Одесская национальная академия пищевых технологий

Чабанова О.Б.

Одесская национальная академия пищевых технологий

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗООБМЕНА ПРИ АЭРОБНОЙ ОБРАБОТКЕ НАНОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ ИЗ ПАХТЫ

В статье исследованы основные закономерности транспорта кислорода в системе «газ-жидкость» при аэробной обработке ретентата, полученного при нанофильтрации ультрафильтрационного пермеата пахты. Этот продукт является ценной питательной средой для микробиологических производств. Массоперенос изучался при использовании конструкции с вращающимся полым конусом. При погружении конуса в жидкость и вращении наблюдалось образование тонкой пленки. Пленка и ее перемещение создают хорошие условия для эффективного растворения кислорода. Измерены концентрации кислорода в жидкости при вращении конуса в разных режимах. Массообмен кислорода значительно зависит от частоты вращения и глубины погружения конуса. Установлено, что при увеличении глубины погружения требуется увеличение угловой скорости вращения для эффективного массообмена. Определены удельные энергозатраты для данной конструкции в сравнении с традиционной турбинной мешалкой. Проведен математический анализ принципа работы аппарата. Предложена модель массопереноса, которая адекватно отражает основные закономерности переноса кислорода в системе «газ-жидкость».

Ключевые слова: *аэраторы, аэробная ферментация, перенос кислорода, система «газ-жидкость», математическая модель, питательные среды, экономическая эффективность аэробной ферментации, активность роста аэробных микроорганизмов.*

Постановка проблемы. Во многих процессах переработки молока образуются побочные продукты, которые содержат ценные питательные вещества для микроорганизмов. Это определяет их широкое применение в качестве питательных сред в биотехнологии. При производстве безлактозных продуктов из пахты в процессе мембранного удаления лактозы образуется значительное количество нанофильтрационного ретентата. Содержание углевода в этом продукте достигает 20% и более. Утилизация концентрата лактозы может проходить различным путем. Перспективным направлением является использование его в аэробных ферментационных процессах. В этом случае в субстрате создаются условия для благоприятного развития микрофлоры определенного вида. От концентрации кислорода в субстрате значительно зависит активность роста микроорганизмов. В жидкой среде микроорганизмы не

усваивают кислород непосредственно из воздуха. Их рост сдерживается запасом растворенного в жидком субстрате кислорода. Кроме того, в питательных средах растворимость кислорода много меньше, чем в чистой воде. Поэтому насыщение и распределение кислорода в аэробных биотехнологических процессах является важной задачей. Решение этой задачи позволяет значительно увеличить биомассу и повысить эффективность процесса. От биомассы в конечном итоге зависит накопление различных веществ-метаболитов, среди которых есть целевые продукты биотехнологии.

Насыщение субстрата кислородом воздуха осуществляется принудительно с помощью различных устройств – аэраторов. Они отличаются конструктивными особенностями и эффективностью. Выбор определенного типа аэраторов является важной задачей. Свойства субстрата, конеч-

ная цель ферментации и общий экономический эффект процесса всегда взаимосвязаны. В экономической части характеристики биотехнологического процесса аэробной ферментации значительное место принадлежит затратам на насыщение субстрата кислородом. Поэтому поиск эффективных средств для решения этой проблемы остается актуальным, тем более что универсальных эффективных устройств для аэрации не существует ввиду особенных свойств каждого субстрата.

Анализ последних исследований и публикаций. При биотехнологической переработке жидких сред обычно используют емкости закрытого типа – биореакторы или ферментеры. Они имеют теплообменник, устройство для подачи растворов, для выгрузки субстрата, его перемешивания, насыщения кислородом воздуха. Последние устройства разнообразны по конструкции [1–11].

В таких конструкциях воздух может не только быть источником кислорода, но и перемешивать среду, т. е. использоваться для эффективного газораспределения. Например, этот принцип реализуется в газотурбинных перемешивающих устройствах [1–3]. В других случаях используются эжекторы, подающие воздух в жидкую или газо-жидкостную среду, которые перекачиваются насосами [3–6]. Широко используются также эйрлифтные модифицированные системы, позволяющие осуществить перенос кислорода воздуха в биологических процессах [3; 7–9]. Во многих случаях используют различные барботёры, через которые воздух подается под давлением [3; 4; 10; 11]. Указанные конструкции используются в традиционных биореакторах. У всех традиционных биореакторов есть общий существенный недостаток – значительные энергозатраты на аэрацию среды. Они составляют более 2 кВт/м³ объема жидкости [3; 11]. Другой общий недостаток – значительное пенообразование, которое всегда сопровождает процесс аэрирования субстрата. Пена не только уменьшает рабочий объем биореактора, но и требует дополнительных затрат на ее разрушение. Данная проблема решается применением механических и/или химических пеногасителей [12–15]. В качестве химических пеногасителей часто применяют силиконы и другие водонерастворимые добавки. Эти вещества весьма эффективны, но существенно уменьшают скорость переноса кислорода и тормозят развитие микроорганизмов. Механические пеногасители всегда требуют дополнительных энергозатрат и усложняют конструкцию биореактора [14; 15]. К тому же механический принцип пеногашения можно

реализовать не во всех ферментерах, например, при их значительном объеме. Проблема пенообразования не являлась целью данного исследования, однако визуально был отмечен значительно меньший объем пены в сравнении с газотурбинной мешалкой.

Способы аэрирования жидкостей в биотехнологии рассматривались в ряде работ [12–18].

В представленном исследовании отражены результаты испытаний конструкции американских ученых, запатентованной в свое время [19]. В качестве субстрата использовали не чистую воду, как авторы изобретения, а наноконцентрат лактозы, который предполагается использовать для биотехнологических процессов. Идея авторов, на наш взгляд, очень интересна и отличается оригинальным принципом аэрирования, отличным от тех, что применяются до сих пор в традиционных биореакторах.

В данной работе представлены основные результаты апробации заимствованной идеи в лабораторных условиях.

Постановка задачи. Цель работы – тестирование и анализ работы запатентованной конструкции аэратора с конической центробежной насадкой для биотехнологической обработки нанофильтрационного ретентата лактозы.

Для достижения цели авторы решали следующие задачи:

1. Изготовление лабораторного модифицированного стенда и конического аэратора.
2. Испытание основного рабочего органа – вращающегося конуса в среде наноконцентрата лактозы.
3. Теоретический анализ основных явлений в процессе работы установки.
4. Получение необходимых экспериментальных данных для установления основных закономерностей при работе установки и создание математической модели массопереноса кислорода при обработке наноконцентрата лактозы.
5. Выводы и выбор направлений дальнейших исследований.

Материалы и методы исследований:

1. Теоретические исследования проводились с помощью анализа соответствующей литературы по теоретической механике, биотехнологии и математической модели, адаптированной к данным исследованиям.

2. Экспериментальные исследования.

Изложение основного материала исследования. В качестве лабораторного стенда использовалась конструкция, которая изображена на рис. 1.

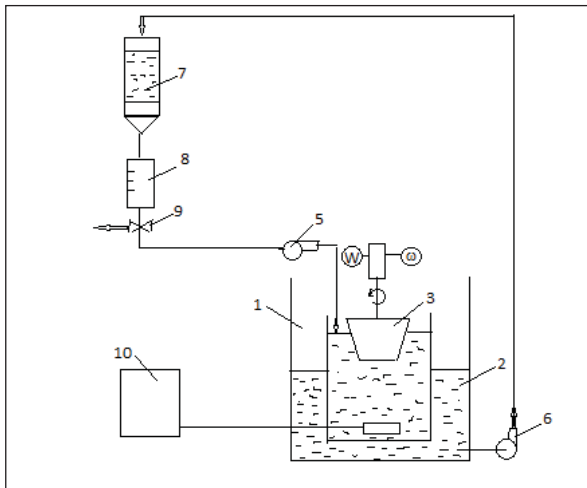


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда

1 – внешняя емкость с жидкостью; 2 – внутренняя емкость с жидкостью; 3 – конус; 4 – мотор с тахометром и ваттметром; 5, 6 – насосы; 7 – питающая емкость; 8 – ротаметр; 9 – кран; 10 – оксиметр

Две емкости цилиндрической формы помещаются одна в одну. Внутренняя емкость диаметром 30 см содержит исследуемый жидкий субстрат. В жидкость погружается вращающийся полый усеченный конус высотой 12 см с большим и меньшим диаметрами 25 см и 6 см. В верхней части конуса есть небольшая горизонтальная площадка шириной 1 см. Вращение от двигателя передается через вал конусу. Двигатель постоянного тока снабжен тахометром и ваттметром.

При вращении погруженного конуса на поверхности конуса образуется пленка. Это явление – результат действия трех сил: тяжести, центробежной и силы Кориолиса. Пленка перемещается вверх. Когда жидкость достигает конца конуса, она срывается. Это приводит к каплеобразованию. Капли достигают стенок внешнего цилиндра и спадают. На стенках образуется пленка, которая стекает в основной объем. Процесс повторяется непрерывно, т. к. циркуляционный насос подает жидкость в питающую емкость. Из этой емкости другой насос

через ротаметр подает жидкость во внутреннюю емкость. Расходы жидкостей согласованы. Уровень жидкости во внутренней емкости регулируется за счет подачи насоса из питающей емкости. Расход жидкости, образующей пленку, устанавливается в зависимости от уровня во внутренней емкости. Показания ротаметра соответствуют скорости потока пленки при неизменном уровне во внутренней емкости.

Объектом исследования служил нанофильтрационный ретентат пахты, полученный в лаборатории из ультрафильтрационного пермеата пахты с помощью мембран для нанофильтрации марки ОПМН-П (производства «Владипор», Россия) при рабочих параметрах $p=1,6$ МПа, $t=50^\circ\text{C}$.

Датчик кислорода был помещен во внутреннюю емкость для устранения ошибки при определении коэффициентов массопереноса за счет контакта «газ-жидкость» во внешней емкости. Объем жидкости составлял 5 дм³. Концентрация кислорода в среде определялась оксиметром

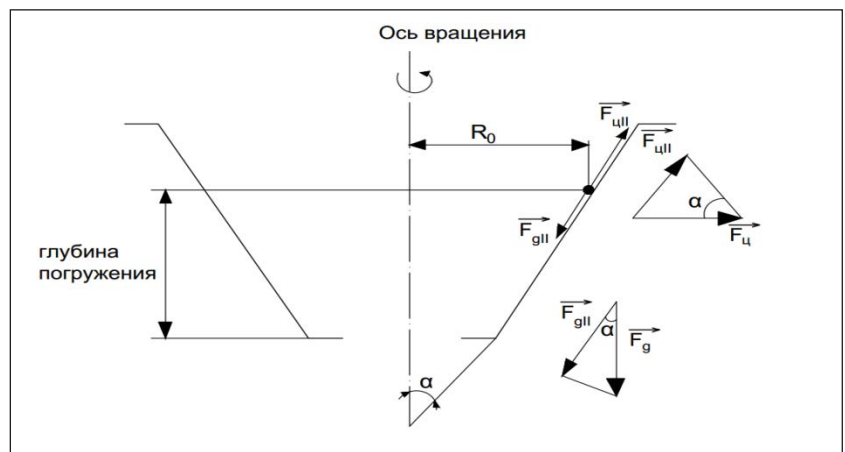


Рис. 2. Схема к анализу сил, которые действуют на пленку на поверхности усеченного конуса

α – полуугол; R_0 – радиус при глубине погружения; $|F_{цII}|$, $|F_{гII}|$ – составляющие центробежной силы и силы тяжести, которые параллельны поверхности конуса

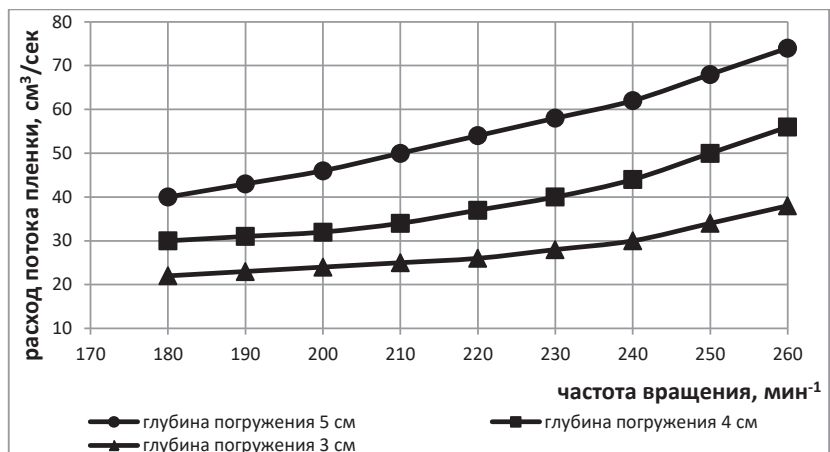


Рис. 3. Скорость потока для вращающегося конуса

АЖА 101 2М (Гомельский завод измерительных приборов, Беларусь).

Экспериментальные данные использовались в расчетах.

**Результаты исследований и их обсуждение
Теоретические исследования**

На рис. 2 представлена упрощенная схема распределения сил, действующих на пленку субстрата в точке рассмотрения. Не учитывается сила Кориолиса.

На поверхности погруженной конической конструкции при вращении пленка не движется при равенстве центробежных сил и силы тяжести. Центробежная сила имеет составляющую $|F_{ц}|$, которая параллельна поверхности конуса. Сила тяжести имеет такую же составляющую $|F_{mII}|$. Если $|F_{ц}| > |F_{mII}|$, пленка перемещается вверх. Следовательно, можно определить критическую угловую скорость исходя из известных зависимостей

$$|F_{цII}| = \rho R_o \times \omega^2 \times \cos(90 - \alpha) \tag{1}$$

$$|F_{mII}| = \rho g \cos \alpha \tag{2}$$

$$|F_{цII}| = |F_{mII}| \tag{3}$$

тогда

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{R_o \cos(90 - \alpha)}} \tag{4}$$

где $|F_{цII}| = \rho R_o \times \omega^2 \times \cos(90 - \alpha)$ – центробежная сила, действующая на единицу объема жидкости;

$|F_{m}| = \rho g \cos \alpha$ – сила тяжести, действующая на единицу объема жидкости;

$|F_{цII}|$, $|F_{mII}|$ – составляющие сил, которые параллельны поверхности конуса;

R_o – радиус окружности на глубине погружения;

α – полуугол конуса;

ρ – плотность жидкости;

ω – угловая скорость вращения.

Скорость изменения концентрации кислорода в объеме жидкости можно определить в зависимости от сопротивления пленки из известного уравнения:

$$\frac{dc}{dt} = K_L \times a \times (C^* - C) \tag{5}$$

где C – концентрация кислорода в основном объеме жидкости;

C^* – равновесная концентрация кислорода на границе «газ-жидкость», которая зависит от парциального давления и температуры;

a – поверхность контакта единицы объема жидкости;

K_L – коэффициент скорости переноса;

t – время.

Интегрируя уравнение (5), получим

$$K_L \times a \times t = -\ln\left(1 - \frac{C}{C^*}\right) \tag{6}$$

Это уравнение можно использовать для вычислений коэффициента массопереноса $K_L \times a$. Для этого достаточно построить график в полулогарифмических координатах. Экспериментальные данные в этом случае образуют наклонные прямые линии.

Экспериментальные исследования

На рис. 3 представлены зависимости расхода потока пленки от частоты вращения конуса.

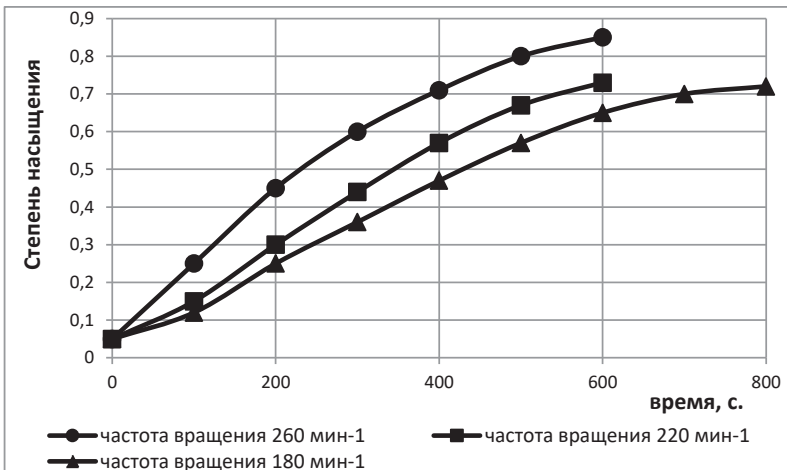


Рис. 4. Зависимость относительной растворимости кислорода от времени при разных скоростях

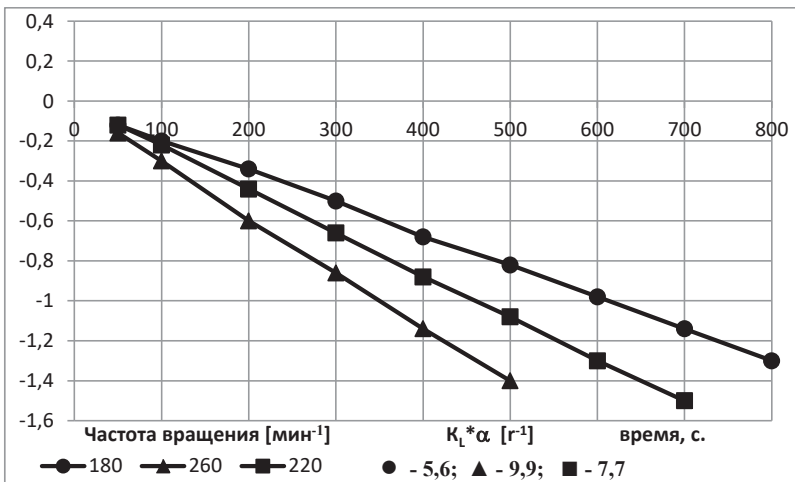


Рис. 5. Графики для определения коэффициентов массопереноса

Визуально установлено, что при частоте вращения до 160 мин^{-1} пленка покрывала только часть поверхности. Увеличение частоты вращения со 160 мин^{-1} до 260 мин^{-1} приводило к образованию сплошной пленки на всей поверхности. Однако дальнейший рост частоты требовал неоправданных энергозатрат. Энергозатраты возрастали интенсивнее, чем увеличение частоты вращения.

Различными были результаты в зависимости от глубины погружения конуса. При глубине 3–5 см наблюдалась стабильная пленка. При глубине менее 3 см эффект был гораздо хуже. При глубине более 5 см для образования пленки на поверхности оставалось мало площади.

На рис. 4 отражены результаты измерений и вычислений степени насыщения кислородом субстрата от времени при глубине погружения конуса 5 см.

Чем выше частота вращения, тем больше скорость. Теоретические зависимости (5, 6) и экспериментальные данные рис. 4 позволяют построить график в полулогарифмических координатах (рис. 5). Значения $K_L \times a$ определяются из графиков для различных частот вращения. Эти значения отмечены на рис. 5.

Насыщение кислородом жидкого субстрата требует определенных энергозатрат. Эта зависимость представлена на рис. 6 для трех испытанных глубин погружения.

Как следует из рисунка, с увеличением глубины погружения удельные энергозатраты для одинаковых степеней насыщения кислородом будут снижаться в диапазоне глубин 3–5 см.

Исходя из теоретических заключений (2, 3, 10, 14), рассчитанная критическая угловая скорость вращения составляет 105 мин^{-1} . Для этого при глубине погружения конуса 5 см измерили $R_0=8 \text{ см}$, полуугол конуса $\alpha=40^\circ\text{C}$. Начало перемещения пленки визуально отмечалось при частоте вращения 160 мин^{-1} . Значительное различие расчётного и экспериментального значений $\omega_{кр}$, возможно, связано с образованием воронки на поверхности жидкости при вращении конуса. Это является причиной перераспределения жидкости. На поверхности пленки наблюдались небольшие спиральные волны. Расчет числа Рейнольдса подтвердил, что массоперенос в эксперименте соответствует ламинарному режиму волнистой пленки.

Результаты массопереноса по предложенной упрощенной модели (5) вполне удовлетворительны. Лучшее значение $K_L \times a$ для данной конструкции около 10 г^{-1} намного отличается от сообщаемого в [14; 15; 18] значения для биореактора с газовой турбиной 400 г^{-1} . По нашему мнению, действительное значение $K_L \times a$ для этого типа реактора будет намного меньше из-за необходимости добавки пеногасителя. Этот агент серьезно затрудняет перенос кислорода.

Следует отметить, что в данной работе исследовался только пленочный режим. В действительности массообмен при вращении конуса в представленной конструкции происходит в трех режимах: восходящая пленка, капли и падающая пленка. Для капельного режима следует ожидать намного большей поверхности контакта «газ-жидкость». Увеличить время контакта в этом режиме можно, если изменить конфигурацию конуса в емкости. Тогда следует ожидать дополнительного увеличения $K_L \times a$. К тому же можно использовать концентрично расположенные несколько конусов или их каскад. Такой прием должен привести к значительному эффекту роста массопереноса кислорода.

Выводы. С учетом изложенного выше можем констатировать следующее:

1. Для одного вращающегося полого конуса лабораторного стенда было получено значение коэффициента массопереноса 10 г^{-1} . При этом затраченная энергия составила менее $0,2 \text{ кВт}\cdot\text{с}/\text{м}^3$.
2. Для анализа массопереноса кислорода в испытанной конструкции может использоваться известная простая модель для скорости переноса. Однако могут быть некоторые неточности из-за допущения равенства концентраций кислорода в пленке и основном объеме жидкости.

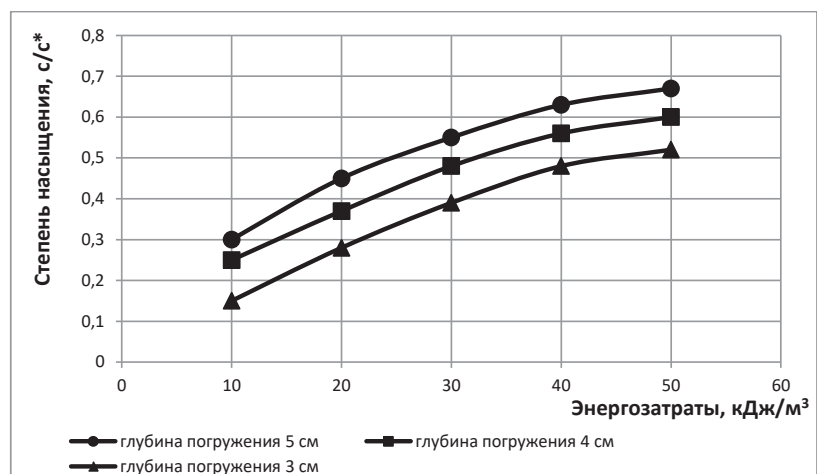


Рис. 6. Зависимость относительного насыщения кислородом от удельных энергозатрат процесса

3. Исследованы условия образования и характер пленки. Установлено, что при низкой частоте вращения (менее 160 мин⁻¹) непрерывная пленка не образуется. С ростом этого показателя пленка формируется как непрерывный поток.

4. На угловую скорость вращения, которая необходима для образования пленки, значительно влияет глубина погружения. Увеличение глубины приводит к требованию большей скорости и энергозатратам.

5. Представленные теоретические и экспериментальные результаты относятся к открытому типу аппарата. Однако такой подход и результаты

в равной мере будут относиться к закрытому типу.

6. Для увеличения коэффициента массопереноса конструкцию можно модернизировать. Например, можно разместить несколько конусов концентрически или каскадно.

7. Несмотря на образование пены и расслоение ретентата лактозы, испытанную конструкцию можно рекомендовать для аэрирования данного субстрата в процессах биотехнологической обработки.

В продолжение исследований планируется оптимизировать конструкцию относительно энергозатрат, пенообразования и расслоения нано-фильтрационного ретентата.

Список литературы:

1. Резенчук О.Є. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з пневматичним перемішуванням. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2011. № 3. С. 79–84.
2. Закоморний Д.М. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з механічними перемішувачами пристроями в аеробних процесах біотехнології. ScienceRise. 2015. № 5/2 (10). С. 24–32.
3. Виестур У.Э., Кузнецов А.М., Савенков В.В. Системы ферментации. Рига: Зинатне, 1986. 174 с.
4. Разработка и проектирование ферментационного оборудования для аэробного культивирования одноклеточных микроорганизмов: учеб.-метод. пособие / А.Г. Новоселов и др. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 91 с.
5. Сидоров Ю.І. Промислові ферментери. Біотехнологія. 2012. Т. 5. № 3. С. 33–39.
6. Копиленко А.В. Класифікація та аналіз роботи промислових ферментерів з підведенням енергії рідкою фазою. Наукові праці НУХТ. 2017. Том 23. № 1. С. 134–143.
7. Ферментационные аппараты для процессов микробиологического синтеза / А.Ю. Винаров и др. Москва: ДеЛи принт, 2005. 278 с.
8. Beefink H. H. and Staugard. Structure and dynamics of anaerobic bacterial aggregates in a gas-lift reactor. Appl. Env. Micr. 1986. № 52. P. 1139–1146.
9. Chisti Y. and Moo-Young M. Improve the performance of airlift reactors. Chem. Eng. Prog. 1993. № 89 (6). P. 38–45.
10. Карпов А.А. Масштабирование процессов глубинного культивирования микроорганизмов в биореакторах: автореф. дисс. ... канд. биол. наук: спец. 03.00.23. Московская область, Щелковский район, п/о Кашинцево, пос. Биокombинат: Всероссийский научно-исследовательский и технологический институт биологической промышленности РАСХН, 2004. 20 с.
11. Импульсные аппараты и перспектива их использования в биотехнологии / А.Е. Сычев и др. Известия Коми научного центра УрО РАН. Сыктывкар, 2012. Вып. 3 (11). С. 33–37.
12. Бирюков В.В. Потребление кислорода мицелиальными культурами микроорганизмов в биореакторе. Теор. основы хим. технологии. 2008. № 5. С. 556–563.
13. Сидоренко О.Д., Черданцев Е.В. Биологические технологии утилизации отходов животноводства. Москва: МСХА, 2001. 74 с.
14. Тишин В.Б. Культивирование микроорганизмов: кинетика, гидродинамика, тепломассообмен. Санкт-Петербург: Издательство РАПП, 2012. 180 с.
15. Елинов Н.П. Основы биотехнологии. Санкт-Петербург: Издательская фирма «Наука», 1995. 600 с.
16. McCarty P.L. Environmental biotechnology: principles and applications. Tata McGraw-Hill Education, 2012.
17. Барабаш В.М. Проблемы и тенденции развития теории и практики перемешивания жидких сред. Теор. основы хим. технологии. 2007. № 2. С. 140–147.
18. Ружинська Л.І. Математичне моделювання перемішування при культивуванні біологічних агентів, чутливих до напружень зсуву. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. Т. 1. № 4 (61). С. 27–30.
19. Centrifugal film fermentor / Roubicek R.V, Feres V. Patent Application U.S. № 06/897350.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАЗООБМІНУ ПІД ЧАС АЕРОБНОГО ОБРОБЛЕННЯ НАНОФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПРОДУКТІВ ІЗ МАСЛЯНКИ

У статті досліджено основні закономірності транспортування кисню в системі «газ-рідина» під час аеробного оброблення ретентату, отриманого в процесі нанофільтрації ультрафільтраційного пермеату маслянки. Цей продукт є цінним поживним середовищем для мікробіологічних виробництв. Масоперенесення вивчався при використанні конструкції з обертовим порожнистим конусом. Під час занурення конуса в рідину й обертання спостерігалось утворення тонкої плівки. Плівка та її переміщення створюють хороші умови для ефективного розчинення кисню. Виміряні концентрації кисню в рідині під час обертання конуса в різних режимах. Масообмін кисню значно залежить від частоти обертання і глибини занурення конуса. Установлено, що в разі збільшення глибини занурення потрібне збільшення кутової швидкості обертання для ефективного масообміну. Визначено питомі енерговитрати для цієї конструкції порівняно з традиційною турбінною мішалкою. Проведено математичний аналіз принципу роботи апарату. Запропоновано модель масоперенесення, яка адекватно відображає основні закономірності перенесення кисню в системі «газ-рідина».

Ключові слова: аератори, аеробна ферментація, перенесення кисню, системи «газ-рідина», математична модель, поживні середовища, економічна ефективність аеробної ферментації, активність зростання аеробних мікроорганізмів.

IMPROVEMENT OF GAS EXCHANGE EFFICIENCY IN AEROBIC PROCESSING OF NANO-FILTRATION PRODUCTS FROM BUTTERMILK

The main regularities of oxygen transport in the gas-liquid system in the aerobic treatment of a retentate obtained by nanofiltration of buttermilk ultrafiltration permeate are studied. This product is a valuable nutrient medium for microbiological productions. Mass transfer was studied using a rotating hollow cone design. When the cone was immersed in a liquid and rotated, a thin film was observed. The film and its movement create good conditions for effective dissolution of oxygen. The oxygen concentrations in the liquid are measured as the cone rotates in different modes. Mass transfer of oxygen significantly depends on the frequency of rotation and the depth of immersion of the cone. It is established that with increasing depth of immersion, an increase in the angular velocity of rotation is required for an effective mass change. Specific energy inputs for this design are determined in comparison with a traditional turbine stirrer. The mathematical analysis of the operating principle of the apparatus is carried out. A model of mass transfer is proposed, which adequately reflects the basic laws of oxygen transfer in the gas-liquid system.

Key words: aerators, aerobic fermentation, oxygen transfer, gas-liquid systems, mathematical model, nutrient media, economic efficiency of aerobic fermentation, activity of aerobic growth of microorganisms.