


На правах рукописи

АЛЕКСАНДРОВСКАЯ ЮЛИЯ ПАВЛОВНА



АЭРОБНОЕ КУЛЬТИВИРОВАНИЕ СПИРТОВЫХ ДРОЖЖЕЙ
В БИОРЕАКТОРЕ С МЕМБРАННЫМ АЭРИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

03.00.23 - Биотехнология

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2004

Работа выполнена на кафедре химической кибернетики Казанского государственного технологического университета

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Емельянов Виктор Михайлович

кандидат технических наук
Мухачев Сергей Германович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Николаев Николай Алексеевич

кандидат биологических наук
Григорьян Борис Рубенович

Ведущая организация: Российский химико-технологический университет
им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Защита диссертации состоится 22 декабря 2004 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.080.02 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68 (зал заседаний Ученого совета, А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан «19» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



А.С. Сироткин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Традиционное выращивание дрожжей в спиртовом производстве осуществляется в анаэробных условиях при относительно низких скоростях роста и повышенном удельном расходе субстрата. Анаэробное культивирование дрожжей осуществляют поэтапно путем их размножения во всевозрастающих количествах суслу и пересевом активно бродящих дрожжей из меньших объемов в большие. При этом узел дрожжегенерации часто является существенным источником инфекции, развитие которой наносит значительный ущерб спиртовому производству: нарушает нормальный ход технологического процесса, уменьшает выход готовой продукции, ухудшает его качество.

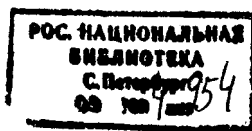
Одним из основных способов снижения уровня инфицирования спиртового производства, повышения активности дрожжей является выращивание чистой культуры в стерильных условиях по интенсивной аэробной технологии, поскольку именно аэрация культуральной жидкости, снабжение дрожжей кислородом, является ключевым фактором, способствующим накоплению активной биомассы, а стерильные условия ведения процесса резко снижают вероятность заражения посевного материала посторонней микрофлорой, повышают качество засевной культуры.

Реализация более эффективных аэробных процессов культивирования дрожжей сопряжена с проблемой обеспечения асептических условий подвода кислорода и низкой степенью извлечения кислорода из барботируемого газа.

Единственным экономически приемлемым в широких масштабах источником кислорода в настоящее время является воздух, хотя в некоторых случаях не исключается целесообразность применения и чистого кислорода. Низкая равновесная концентрация кислорода в культуральной жидкости при аэрации воздухом и необходимость обеспечения интенсивной массопередачи при фазовых переходах газ-жидкость и жидкость-клетка требуют разработки новых подходов к проблеме аэрации для повышения эффективности дрожжегенерации в спиртовом производстве.

Работа выполнялась в соответствии с межрегиональными научно-техническими программами «Биотехнология» (1996-1997 гг.), «Научные исследования высшей школы по технологии живых систем» (2000 г.), «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям» (2003-2004 гг.).

Цель работы. Настоящая работа посвящена разработке интенсивной аэробной технологии дрожжегенерации в мембранном биореакторе. Новый подход к проблеме аэрации в процессе аэробного выращивания посевных материалов в спиртовом производстве заключается в подаче чистого кислорода



или обогащенного кислородом воздуха в биореактор через непористые полимерные мембраны-шланги.

В соответствии с поставленной целью основными задачами исследования являлись:

- Исследование переноса кислорода через гомогенную полимерную мембрану. Определение закономерностей массопереноса в системе газ-мембрана-жидкость.
- Разработка конструкции мембранного биореактора для культивирования спиртовых дрожжей.
- Изучение массообменных характеристик мембранного биореактора.
- Изучение роста спиртовых дрожжей при периодическом, отъемно-доливном и непрерывном культивировании в мембранном биореакторе.
- Математическое моделирование процесса ферментации в мембранном биореакторе.
- Расчет системы обогащения воздуха кислородом с использованием жидких перфторуглеродов.

Научная новизна. Впервые разработан технологический процесс аэробной генерации спиртовых дрожжей с высокими асептическими характеристиками, включающий:

- трехстадийную систему обогащения воздуха кислородом на пассивных перфторуглеродных мембранах, позволяющую получать до 77% кислорода в азот-кислородной смеси;
- систему аэрации на основе силиконовой мембраны, позволяющую обеспечить асептические условия культивирования, осуществить беспузырьковый ввод кислорода в культуральную жидкость и снизить интенсивность пенообразования.

Практическая ценность работы. Разработанный технологический процесс позволяет реконструировать без значительных затрат участок дрожжегенерации спиртовых заводов и существенно повысить выход чистой культуры спиртовых дрожжей.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на III научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в спиртовой и ликероводочной отрасли» (Москва, 2001 г.), Международном конгрессе «Биотехнология - состояние и перспективы развития» (Москва, 2002 г.), XVII Менделеевском съезде по общей и прикладной химии (Казань, 2003 г.), научной конференции «Постгеномная эра в биологии и проблемы биотехнологии» (Казань, 2004 г.), Международной научно-технической конференции ММХТ-17 (Калуга, 2004 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликованы 5 статей и тезисы 11 докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы и приложений.

В первой главе представлен обзор научных публикаций по вопросам влияния концентрации растворенного кислорода на культивирование микроорганизмов, транспорта кислорода через мембраны, рассмотрены математические модели массопередачи и способы получения обогащенного кислородом воздуха. Сформулированы задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена экспериментальному изучению массопереноса кислорода через силиконовую мембрану. Обоснован выбор материала мембраны для беспузырькового ввода кислорода в культуральную жидкость. Приведены методика и результаты экспериментального исследования скорости массопередачи кислорода через силиконовую мембрану-шланг. По экспериментальным данным рассчитаны значения коэффициента массопередачи кислорода в феноменологическом уравнении массопередачи для двух отрезков рабочей области перепада давления на мембране. Экспериментально изучен массоперенос кислорода через мембрану в условиях модельной химической реакции, получена оценка массопередачи кислорода в мембранном биореакторе.

Третья глава содержит результаты периодических с дробными подпитками, объемно-доливного и непрерывного процессов культивирования спиртовых дрожжей в биореакторе с подводом кислорода через силиконовую мембрану. Показана эффективность аэробного культивирования спиртовых дрожжей по сравнению с анаэробным.

В четвертой главе исследована математическая модель культивирования спиртовых дрожжей с учетом энерго-материальных балансов процессов, анаэробного брожения в условиях лимита по кислороду и аэробного дыхания в его отсутствии. Идентифицированы кинетические параметры модели по экспериментальным данным. Приведены результаты моделирования культивирования спиртовых дрожжей в мембранном биореакторе в различных режимах.

В пятой главе рассмотрены вопросы автоматизированного технологического проектирования системы обогащения воздуха кислородом с использованием жидких перфторуглеродных мембран, обеспечивающей производительность, соответствующую потребностям участка наработки чистой культуры спиртовых дрожжей. Приводятся результаты расчета схемы обогащения воздуха кислородом с помощью моделирующей программы ChemCad.

Работа изложена на 139 страницах, проиллюстрирована 36 рисунками, содержит 14 таблиц. Библиография содержит 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ ситуации, сложившейся в спиртовой промышленности России и у ведущих зарубежных производителей этанола показывает, что анаэробная технология дрожжегенерации спиртовых дрожжей должна быть заменена на аэробную. Только при этом условии можно создать новые высокоэффективные ресурсосберегающие технологии, при которых российский спирт станет конкурентоспособен.

Переход на аэробные технологии связан с заменой участка подготовки чистой культуры спиртовых дрожжей на новый, позволяющий осуществлять культивирование в асептических условиях. Источниками инфицирования действующих производств служат главным образом сальниковые уплотнения перемешивающих устройств дрожжанок и поступающий на аэрацию ферментационной среды воздух. Исключение инфицирования через системы аэрации и перемешивания позволит решить проблему асептики в ферментерах и тем самым повысить технико-экономические показатели спиртового производства.

В данной работе предлагается осуществлять снабжение растущей культуры кислородом через гомогенные полимерные цилиндрические мембраны-шланги. При этом наряду с решением проблем асептики сокращаются проблемы, связанные с пенообразованием в культуральной жидкости.

Исследован процесс транспорта кислорода через трубчатую гомогенную силиконовую мембрану. Экспериментальная установка состояла из навитого на основу из нержавеющей стали силиконового шланга, погруженного в емкость с водой. Силиконовый шланг соединялся с баллоном, заполненным техническим кислородом, через дюритовый шланг и систему переходников. Методика проведения эксперимента заключалась в заполнении фиксированного объема системы, состоящей из силиконового шланга и коммуникаций, кислородом из баллона при определенном давлении с последующей фиксации изменения давления в системе при диффузии кислорода через мембрану в воду. Измеряли изменения величин внешнего диаметра и длины силиконового шланга при изменении избыточного давления в системе. На основании указанных измерений рассчитывали геометрические характеристики мембраны, в том числе площадь поверхности, и скорость переноса через мембрану (по данным о падении давления в полости мембраны). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Удельная скорость диффузии кислорода через силиконовую мембрану при вариации избыточного давления в полости мембраны.

Давление кислорода, ати	Площадь поверхности мембраны, см ²	Скорость диффузии кислорода через мембрану, гО ₂ /час	Удельная скорость диффузии кислорода через мембрану, гО ₂ /час·м ² , отнесенная к . . .	
			начальной поверхности	рабочей поверхности
0,5	186,9	0,0365	1,99	1,95
1,0	192,5	0,0851	4,66	4,42
1,5	197,2	0,1237	6,77	6,27
2,0	206,5	0,1697	9,29	8,22
2,5	356,3	0,2317	12,69	6,50
3,0	390,0	0,3027	16,22	7,59
3,5	464,8	0,4791	26,25	10,31
4,0	522,8	0,5702	31,24	10,91

Барометрический процесс, описываемый уравнением массопередачи, является традиционным представлением модели массопереноса через непористые материалы:

$$R^F_{O_2} = K \cdot F_0 \cdot \Delta p, \quad (1)$$

где $R^F_{O_2}$ - скорость транспорта кислорода через мембрану, гОг/час; $K = P/\Delta$ - коэффициент массопередачи, гОг/см²·час·атм; P - коэффициент проницаемости кислорода через мембрану, гОг·см/см²·час·атм; F_0 - поверхность недеформированной мембраны, см²; Δp - перепад давления кислорода на мембране, атм; Δ - толщина мембраны, см

Значения коэффициента K в уравнении 1 были идентифицированы по экспериментальным данным на двух интервалах перепада давления. На интервале 0 - 2 ати $K = 0,00045$ гО₂/см²·час·атм, на интервале 2 - 3 ати - $K = 0,00073$ гОг/см²·час·атм.

Массоперенос кислорода через мембрану в условиях модельной химической реакции. Для количественной оценки скорости сорбции кислорода использовали сульфитную методику. Эксперимент проводился в лабораторном биореакторе с рабочим объемом 0,5 литра, заполненном раствором сульфита натрия. Технический кислород из баллона подавался в силиконовую мембрану через дюритовый шланг. Исследовались массообменные характеристики лабораторного биореактора при варьировании избыточного давления кислорода в мембранешланге. Результаты представлены на рис.1.



Рис. 1. Зависимости сульфитного числа и скорости транспорта кислорода через мембрану от давления

Очевидно, что скорости переноса кислорода через мембрану и растворения его в жидкости равны при условии, что весь кислород потребляется сразу, не образуя газовых пузырьков. Как следует из рисунка 1, сульфитное число и скорость диффузии кислорода через мембрану практически совпадают.

Зная значения сульфитного числа N при различных значениях

перепада кислорода на мембране биореактора, определяли оценку величины коэффициента массопередачи кислорода K путем идентификации коэффициента K в уравнении

$$N = K_1 \cdot F_0^{y_0} \cdot C^* \quad (2)$$

где $F_0^{y_0}$ - удельная межфазная поверхность при нормальных условиях, $\text{см}^2/\text{см}^3$; $C^* = P \cdot H_e$ - равновесная концентрация кислорода, г/л; P - парциальное давление кислорода, атм; H_e - константа Генри, г/л·атм.

Культивирование спиртовых дрожжей в аэробных условиях в мембранном биореакторе. С целью исследования процесса культивирования спиртовых дрожжей в аэробных условиях в мембранном биореакторе были проведены:

- серия экспериментов по периодическому выращиванию культуры спиртовых дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* XII расы в мембранных биореакторах с рабочими объемами 0,5 литра и 1 литр.
- объемно-доливное культивирование дрожжей в мембранном биореакторе с рабочим объемом 0,5 литра.
- непрерывное культивирование дрожжей в мембранном биореакторе с рабочим объемом 1 литр, снабженном электромешалкой, системами рН- и термостатирования, регулированием параметров культивирования.

В ходе эксперимента контролировались:

- температура культуральной жидкости;

- уровень кислотности культуральной жидкости;
- перепад давления кислорода на мембране;
- наличие посторонней микрофлоры,

определялись:

- концентрация редуцирующих веществ в культуральной жидкости по методу Бертрана;
- количество клеток с помощью камеры Горяева и концентрация спиртовых дрожжей методом оптической плотности.

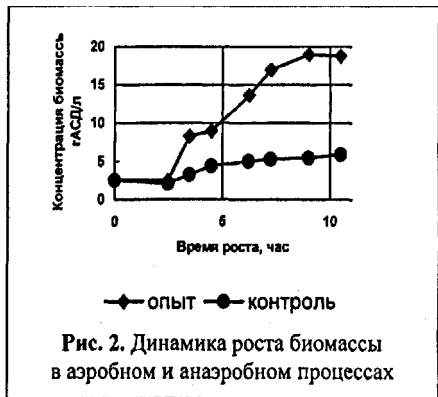
В качестве питательной среды при культивировании спиртовых дрожжей использовали модифицированную среду Ридера.

Результаты периодического культивирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Концентрации биомассы в аэробном и анаэробном процессах

№ эксперимента	Концентрация биомассы, гАСД/л		Прирост биомассы в опыте по отношению к контролю, %
	Опыт	Контроль	
1	10,7	5,4	98
2	11,4	5,3	115
3	18,9	5,8	226
4	15,9	5,9	175
5	23,5	7,1	231

Разброс данных, приведенных в таблице 2, вызван различными условиями культивирования. Тем не менее, очевидна существенная разница в интенсивности процесса роста в условиях опыта и контроля.



В качестве примера реализации процесса на рис. 2 представлена динамика изменения основных параметров культивирования.

Результаты реализации отъемно-доливного процесса в аэробных и анаэробных условиях представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка лаг-фазы аэробного и анаэробного процессов протекали идентично и заняли примерно два часа роста. Экспоненциальные фазы роста

значительно отличаются. Так, если в анаэробном процессе биомасса к пятому часу выросла до 4,62 г/л, то в аэробном - до 7,21 г/л, т.е. в 1,5 раза выше. Далее проводили отливы культуральной жидкости и доливы питательной среды. В сопоставимых условиях культивирования за 9,25 часов биомасса



Рис. 3. Динамика роста биомассы в аэробном и анаэробном отъемно-доливных процессах

дрожжей в эксперименте выросла с 1,8 до 10,6 гАСД/л, в опыте - с 1,8 до 6,2 гАСД/л. Средняя продуктивность аэробного процесса при этом составила 2,9 г/л-час, а анаэробного - 1,72 г/л-час. Таким образом, продуктивность аэробного процесса в мембранном биореакторе на 70% выше, чем анаэробного.

Культивирование спиртовых дрожжей в аэробных условиях проводили в автоматизированной ферментационной установке на

основе мембранного биореактора с рабочим объемом 1 литр.

Непрерывное культивирование осуществляли после выхода периодической ферментации на конец экспоненциальной - начало стационарной фазы. Проводили серию экспериментов со скоростью протока D от 0,1 до 0,28 час⁻¹. В ходе экспериментов варьировалась входная концентрация Сахаров от 2,5 до 3,5% и давление кислорода на мембране от 1 до 3 ати. Характеристики непрерывного процесса: скорость протока, концентрация

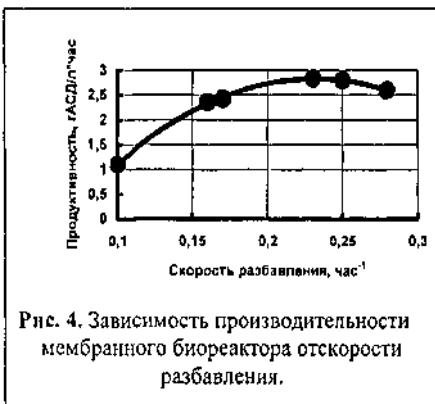


Рис. 4. Зависимость производительности мембранного биореактора от скорости разбавления.

биомассы, концентрация остаточных Сахаров, концентрация растворенного кислорода фиксировали в установившемся состоянии. При этом в качестве показателей стационарного процесса брали усредненные значения за последние 5 часов.

На рис. 4 представлена производительность мембранного биореактора в зависимости от скорости разбавления. Из рисунка следует, что максимальная продуктивность достигается в

области 0,23 час⁻¹ и составляет 2,83 гАСД/л-час. Следует отметить, что увеличение скорости протока с 0,1 до 0,16 час⁻¹ не вызывает существенного роста концентрации остаточных Сахаров. Дальнейшее увеличение скорости разбавления приводит к значительному росту концентрации остаточных Сахаров от 1 г/л при $D=0,17$ час⁻¹ до 11 г/л при $D=0,2$ час⁻¹.

Математическая модель кинетики дрожжегенерации в мембранном биореакторе. Динамическая модель кинетики дрожжегенерации представлена в виде:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = \mu \cdot X \\ \frac{dS}{dt} = -(\alpha_s + \beta_s \cdot \mu) X \\ \frac{dN}{dt} = -\beta_N \cdot \mu \cdot X \\ \frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{F}{V} (P_L \cdot He - C) - (\alpha_o + \beta_o \cdot \mu) X \end{cases} \quad (3)$$

где X, S, C, N - текущие концентрации биомассы, субстрата, растворенного кислорода и источника азота, г/л; μ - удельная скорость роста, час⁻¹; α_s, α_o - удельные скорости затрат субстрата и кислорода в метаболизме поддержания жизнедеятельности, г/гАСД-час; $\beta_s, \beta_o, \beta_N$ - удельные затраты субстрата, кислорода и источника азота в конструктивном обмене, г/гАСД; K_L, P_L - коэффициент массопередачи, л/час-см² и парциальное давление кислорода, атм в малоподвижном слое жидкости, прилегающем к мембране; F - поверхность мембраны, см²; V - объем культуральной жидкости,



Рис. 5. Изменение концентраций биомассы, субстрата и источника азота в периодическом процессе культивирования дрожжей

л; He - константа Генри для кислорода, гО₂/л-атм; t - время процесса, час.

Оценки величин значений параметров уравнений кинетики роста сахаромыцетов были взяты из литературы: $\mu_{max} = 0,5 - 0,6$ час⁻¹; $K_s = 0,025$ г/л, а также частично определены при идентификации модели: $K_N = 0,1$ г/л; $K_c = 0,0003 - 0,0005$ г/л; $\mu_{max}^s = 0,24$ час⁻¹.

В модели учтена неравномерность снабжения клеток кислородом в пространстве, прилегающем к поверхности мембраны, и в ядре потока. При этом условия роста могут меняться от аэробных до анаэробных, что вызывает изменение соотношения гликолиза и окислительного фосфорилирования, в связи с чем соответственно изменяется величина удельной скорости роста. Для указанных условий предложено следующее выражение удельной скорости роста

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{N}{K_N + N} \cdot \left[\frac{C(1 - \omega) + (K_C + C)\omega + K_C \frac{\mu_{\max}^{AN}}{\mu_{\max}} (1 - \omega)}{K_C + C} \right],$$

(4)

где μ_{\max} - максимальная удельная скорость роста в аэробных условиях, час⁻¹; μ_{\max}^A - максимальная удельная скорость роста в анаэробных условиях, час⁻¹; K_S , K_N , K_C - константы лимитирования соответственно концентрациями субстрата, источника азота и кислорода, г/л; ω - доля популяции растущая в аэробных условиях.

$$\omega = \frac{R_o^f \cdot Y_{X/O}}{\mu_{\max} \cdot V \cdot X}, \quad (5)$$

где $Y_{X/O}$ - экономический коэффициент по кислороду, гАСБ/гO₂.

Экспериментальные значения коэффициентов затрат и образования компонентов в процессе биосинтеза определяли на основе поиска величин α_S и β_S , минимизирующих расхождение экспериментальных и расчетных значений $X(t)$ и $S(t)$ (рис. 5). Область поиска неизвестных значений параметров метаболизма α_S и β_S была ограничена расчетными диапазонами, полученными из балансовых уравнений биосинтеза для наилучших и наихудших условий жизнедеятельности. После чего строили экспериментально определенное уравнение конструктивного обмена и рассчитывали остальные параметры.

Удельные затраты источника азота (в пересчете на аммиак) постоянны и равны: $\beta_N = 0,091$ г/гАСБ.

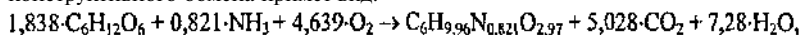
Результаты идентификации представлены в таблице 3.

• Таблица 3. Параметры затрат и образования компонентов в конструктивном обмене и метаболизме поддержания дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, пара XII

Параметр	α_S	α_O	α_C	α_N
----------	------------	------------	------------	------------

Значение, г/ГАСБ· час	0,50	0,53	0,73	-
Параметр	β_S	β_O	β_C	β_N
Значение, г/ГАСБ	2,16	0,97	1,45	0,09

Для экспериментально найденного значения $\beta_S = 2,16$ г/ГАСБ уравнение конструктивного обмена примет вид:



где $C_6H_{9,96}N_{0,821}O_{2,97}$ - условная молекула биомассы (молекулярная масса 153,19 с учетом зольных элементов, по литературным данным).

От известных моделей уравнение динамики концентрации растворенного кислорода отличается формой записи члена, отражающего скорость растворения кислорода в жидкой фазе, равную скорости его транспорта через мембрану. Для условий равенства указанных скоростей

$$K_L \cdot F \cdot (P_L \cdot He - C) = K_1 \cdot \Delta p \cdot F_0 \quad (6)$$

с учетом, что $P_L \cdot He \gg C$, находим среднее действующее парциальное давление кислорода, равновесное с пограничным слоем жидкости, омывающей мембрану:

$$P_L \approx \frac{K_1 \cdot \Delta p \cdot F_0}{K_L \cdot He \cdot F} \quad (7)$$

Расчет мольного потока десорбирующегося углекислого газа выполняли на основе баланса углерода:

$$M_{CO_2} = \frac{72}{12} \left[\frac{R_S}{180} - \frac{R_X}{153,19} \right], \quad (8)$$

где 72 - атомный вес 6-ти атомов углерода, входящих в молекулу субстрата и в условную молекулу биомассы; 180 и 153,19 - молекулярные массы субстрата и биомассы; 12 - атомная масса углерода; R_S - скорость потребления субстрата, г/час; R_X - скорость роста биомассы, гЛСБ/час.

Максимальная скорость продуцирования углекислого газа не превысила 0,2 об/обКЖ-мин., что в пять раз ниже, чем удельный расход воздуха в обычном барботажном режиме аэробного культивирования. Примерно во столько же раз понижена интенсивность пенообразования, что позволяет отказаться от применения химических пеногасителей.

Результаты моделирования. В ходе моделирования выращивания сахаромикетов в мембранном биореакторе была определена потребная удельная поверхность мембраны, выводящая процесс из глубокого лимита по кислороду (рис.6). Потребная расчетная величина поверхности мембраны составила 182,5

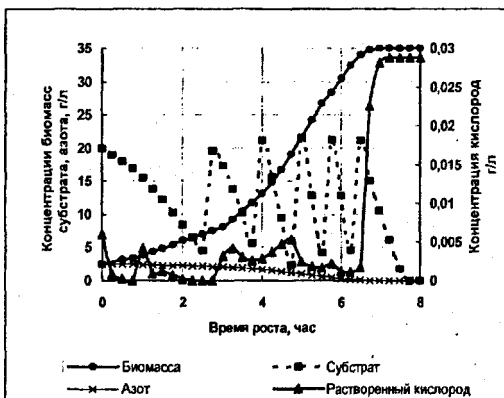


Рис. 6. Моделирование динамики биомассы, субстрата, растворенного кислорода и азота в периодическом процессе культивирования спиртовых дрожжей в мембранном биореакторе при увеличенной поверхности мембраны.

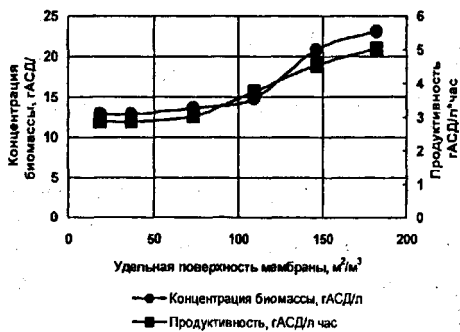


Рис. 7. Расчетные показатели процесса роста дрожжей на шестой час культивирования

$\text{м}^2/\text{м}^3$, что технически реализуемо

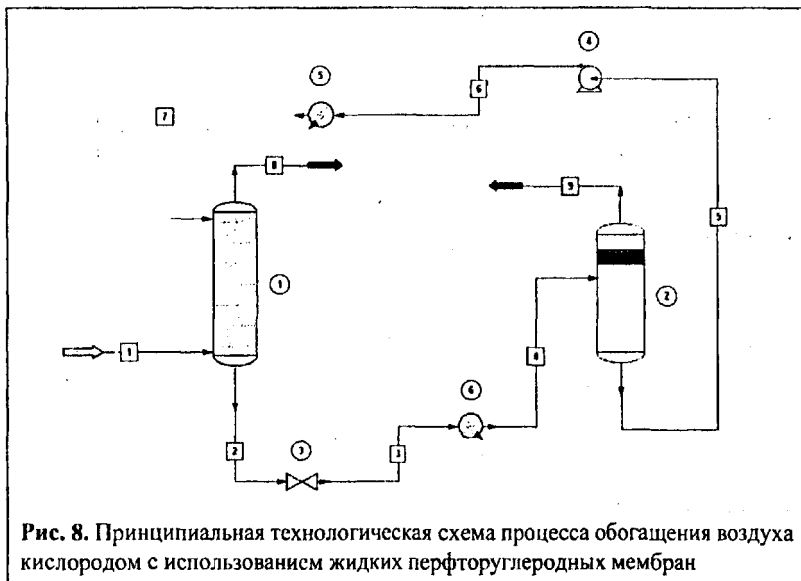
Для условия снятия лимитирования концентрациями субстрата и источника азота получена зависимость максимальной продуктивности от удельной поверхности мембраны (рис. 7).

Для моделирования непрерывного процесса культивирования спиртовых дрожжей в аэробных условиях необходимо учесть влияние скорости разбавления D , час^{-1} . Модельные расчеты показали, что при малых скоростях разбавления $D=0,1-0,15 \text{ час}^{-1}$ стационарное состояние наступает за 2,5-5 часов, а при скоростях разбавления $D=0,16-0,17 \text{ час}^{-1}$ — за 10-12 часов. Увеличение скорости потока до $0,18-0,2 \text{ час}^{-1}$ приводит к возрастанию времени выхода на стационарное состояние до 20-25 часов и подъему концентрации остаточных Сахаров в выходном потоке до 0,5-11 г/л, что связано с возникновением лимита по кислороду. В рассматриваемых

условиях культивирования наибольшая продуктивность достигается при скорости разбавления $0,18 \text{ час}^{-1}$ и составляет $2,3 \text{ гАСД/л·час}$.

Модель позволяет осуществить масштабирование процессов аэробного культивирования спиртовых дрожжей. Результаты экспериментов и моделирования использованы для выбора рекомендуемой удельной поверхности мембраны промышленного дрожжегенератора спиртового производства.

Обогащение воздуха кислородом с использованием жидких пассивных перфторуглеродных мембран. С целью снижения затрат предлагается вместо чистого кислорода при дрожжегенерации в мембранном биореакторе использовать обогащенный кислородом воздух. Обогащение воздуха кислородом может быть осуществлено с использованием жидких пассивных мембран из перфторуглеродов в барботажной колонне со встроенными контактными устройствами с естественной или принудительной циркуляцией, например, в барботажной колонне с насадкой Коха.



Кислород предпочтительнее растворяется в иерфтордекалине по сравнению с азотом. Возможность перемещения его в технологическом процессе с помощью насосов позволяет организовать непрерывный процесс разделения воздуха. В зоне повышенного давления необходимо осуществлять абсорбцию воздуха, а в зоне низкого давления - его десорбцию. Таким образом формируется рецикл, позволяющий в непрерывном режиме получать обогащенную кислородом

воздушную смесь. Полученная таким образом обогащенная кислородом смесь компримируется и подается на следующую ступень обогащения до получения необходимых значений по содержанию кислорода в азотно-кислородной смеси. На рис. 8. представлена технологическая схема одной ступени процесса обогащения воздуха кислородом.

Производительность рассчитываемой установки обогащения воздуха кислородом должна соответствовать потребностям участка наработки чистой культуры спиртовых дрожжей. Для осуществления промышленной ферментации чистой культуры спиртовых дрожжей завода производительностью 3000 дал необходимо, чтобы установка обогащения воздуха кислородом обеспечивала получение 15-18 кг/час обогащенной до 77% кислорода смеси.

В предлагаемой работе расчет системы обогащения воздуха кислородом осуществлялся с помощью моделирующей программы ChemCad.

Результаты расчета трехступенчатой системы обогащения воздуха кислородом приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты расчета системы обогащения воздуха кислородом

Параметр	Степень обогащения		
	I	II	III
Исходные данные			
Число условных тарелок в абсорбционной колонне	20	16	20
Мольная доля кислорода во входном потоке	0,21	0,3888	0,5805
Мольная доля азота во входном потоке	0,79	0,6002	0,4086
Расход газовой смеси, кг/час	100	48,26	30,15
Поток перфтордекалина, кг/час	11828	6028,15	3414,6
Результаты расчета			
Мольная доля кислорода в выходном потоке	0,3888	0,5805	0,7706
Мольная доля азота в выходном потоке	0,6002	0,4086	0,2186
Скорость выходного потока, кг/час	48,26	30,15	21,77

Таким образом, на выходе третьей ступени обогащения получили газовую смесь, содержащую 77,06% кислорода и 21,86% азота.

Профили концентраций кислорода и азота в газовой фазе по высоте абсорбционной колонны для третьей ступени обогащения приведены на рис. 8.

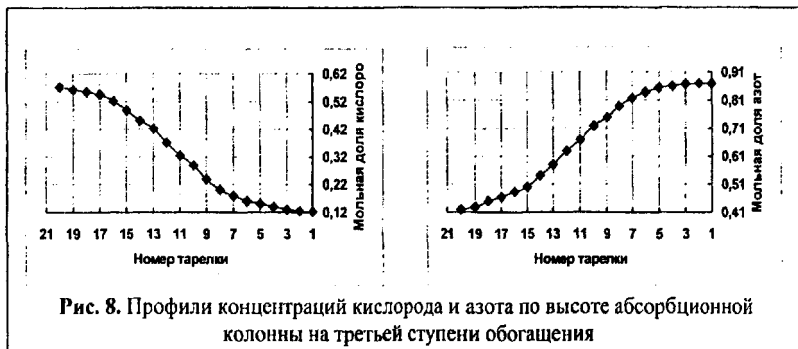


Рис. 8. Профили концентраций кислорода и азота по высоте абсорбционной колонны на третьей ступени обогащения

ВЫВОДЫ

1. Разработан технологический процесс аэробной генерации спиртовых дрожжей с высокими асептическими характеристиками, включающий: трехстадийную систему обогащения воздуха кислородом на пассивных перфторуглеродных мембранах, позволяющую получать до 77% кислорода в азот-кислородной смеси; систему аэрации на основе силиконовой мембраны, позволяющую осуществить беспузырьковый ввод кислорода в культуральную жидкость и сократить ценообразование.
2. Исследованы характеристики силиконовой мембраны, в соответствии с которыми получены значения коэффициента массопередачи кислорода и определены конструктивные параметры, обеспечивающие масштабирование мембранного аэрирующего устройства.
3. Осуществлены периодические с дробными подпитками, отъемно-доливные и непрерывные процессы культивирования спиртовых дрожжей в биореакторе с подводом кислорода через силиконовую мембрану, показавшие увеличение до 3,3 раз продуктивности биореактора по биомассе спиртовых дрожжей по сравнению с анаэробными процессами, проведенными в аналогичных условиях.
4. На основе энерго-материального баланса метаболизма спиртовых дрожжей разработана математическая модель культивирования в мембранном биореакторе, выполнены расчеты типовых режимов ведения процесса и получены

данные, необходимые для проектирования промышленной системы выращивания чистой культуры спиртовых дрожжей.

5. Произведен расчет системы обогащения воздуха кислородом на жидких пассивных перфторуглеродных мембранах, соответствующей производительности участка аэробной дрожжегенерации спиртового завода мощностью 3000 дал/сут.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Емельянов В.М., Александровская Ю.П. Сорбционная установка обогащения воздуха кислородом// Процессы и оборудование экологических производств: Тез. докл. III Межреспубл. науч.-техн. конф., Волгоград, 1995. С. 43.
2. Емельянов В.М., Еналеев Р.Ш., Александровская Ю.П. Физическое и математическое моделирование гидродинамики и массопередачи кислорода в барботажной колонне с насадкой Коха// Массообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Казань, 1997. С. 11-18.
3. Емельянов В.М., Александровская Ю.П. Изучение равновесия и кинетики растворения кислорода в жидких углеводородах// Нефтехимия-96: Тез. докл. IV конф. Нижнекамск, 1996. С. 32.
4. Емельянов В.М., Еналеев Р.Ш., Александровская Ю.П. Разработка метода расчета колонны обогащения воздуха кислородом. Казан, гос. технолог. ун-т. - Казань, 1995. - 7 с. - Деп. в ВНИИТИ г. Москва.
5. Емельянов В.М., Александровская Ю.П. Математическое моделирование и оптимизация сорбционной установки обогащения воздуха кислородом// Математические методы в химии (ММХ-9): Тез. докл. IX Междунар. конф. Тверь, 1995. С. 57-58.
6. Емельянов В.М., Александровская Ю.П. Оптимальное технологическое проектирование колонны обогащения воздуха кислородом// Математические методы в химии (ММХ-10): Тез. докл. X Междунар. конф. Тула, 1996. С. 64.
7. Аппаратурно-технологическое оформление участка аэробной генерации спиртовых дрожжей/ В. М. Емельянов, Ю. П. Александровская, Р. Ш. Еналеев и др.// Научно-технический прогресс в спиртовой и ликероводочной отрасли: Тезисы докл. III Междунар. науч.-практич. конф., посвящ. 70-летию ВНИИ пищевой биотехнологии. М.: Пищепромиздат, 2001. С.72-76.
8. Биотехнологический комплекс участка чистой культуры спиртовых дрожжей/ В.М. Емельянов, И.С. Владимирова, Ю.П. Александровская и др.// Биотехнология - состояние и перспективы развития: Матер. Междунар. конгресса. Москва, 2002. С. 96-98.
9. Аэробная технология генерации спиртовых дрожжей/ Н.К. Филипова, В.М. Емельянов, Ю.П. Александровская и др.// Биомолекулярная химия и

биотехнология: Матер. XVII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Казань^ООЗ,.. С. 310.

10. Александровский Ю.П., Емельянов В.М. Изучение массообмена кислорода в мембранном биореакторе// Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Казань, 2003. С. 98-101.

П. Емельянов В.М., Александровская Ю.Н., Мухачев С.Г. Исследование переноса кислорода в мембранном биореакторе// Постгеномная эра в биологии и проблемы биотехнологии: Матер, науч. конф., Казань, М.: МаксПресс, 2004. С.36-37.

12. Исследование процесса дрожжегенерации в мембранном биореакторе/ В.М. Емельянов, Ю.П. Александровская, Н.К. Филиппова и др.// Постгеномная эра в биологии и проблемы биотехнологии: Матер, науч. конф., Казань, М.: МаксПресс, 2004. С.37-38.

13. Кинетика аэробного культивирования спиртовых дрожжей в мембранном биореакторе/ С.Г. Мухачев, Ю.П. Александровская, Н.К. Филиппова и др.// Вестник Казанского технол. ун-та. 2003. №3 С. 168-172.

14. Аэробная дрожжегенерация в мембранном биореакторе/ С.Г. Мухачев, Ю.П. Александровская, Н.К. Филиппова и др.// Постгеномная эра в биологии и проблемы биотехнологии: Матер, науч. конф., Казань, М.: МаксПресс, 2004. С. 64-65.

15. Александровская Ю.П., Мухачев С.Г., Емельянов В.М. Моделирование процесса дрожжегенерации в мембранном биореакторе: Матер. Междунар. науч. конф. ММХТ-17, Калуга, 2004. С. 78-79.

16. Автоматизированный расчет системы обогащения воздуха кислородом/ Ю.П. Александровская, Н.Н. Зиятдинов, В.М. Емельянов и др.// Теплообменные процессы и аппараты химической технологии: Межвуз. темат. сб. науч. тр. Казань, 2004. С. 84-88.

Соискатель



Заказ 320

Тираж 80

Издательство Казанского государственного технологического университета
Офсетная лаборатория Казанского государственного технологического университета.
420015, Казань, К. Маркса, 68

#23848