

РОЛЬ КИСЛОРОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АППАРАТА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

Г.Е. Кокиева, И.Б. Шагдыров, Ю.А. Шапошников

Проведено исследование способа подвода кислорода в оборудовании. Газосодержание является одним из основных контролируемых гидродинамических параметров, влияющих на протекающие гидродинамические и химические процессы, тепло- и массопередачу. Процесс протекает в биотехнологическом оборудовании – ферментаторе, конструкционная особенность которой может решить техническую задачу – а именно подвода кислорода в питательную среду.

Ключевые слова: гидродинамика химических процессов, подвод кислорода, производительность оборудования.

ВВЕДЕНИЕ

Газосодержание является одним из основных контролируемых гидродинамических параметров, влияющих на протекающие гидродинамические и химические процессы, тепло- и массопередачу. В производствах БВК продуценты кормового белка являются аэробными микроорганизмами. Процессы, происходящие в ферментаторе, отличаются исключительной сложностью, т.к. одновременно протекают процессы микробиологического синтеза и тепломассообмена, накладывающиеся друг на друга. Причем последние зависят от гидродинамической обстановки. При этом гидродинамическая обстановка в ферментаторе и структура потока многофазной системы решающим образом определяют конструктивными особенностями ферментатора и режимами его работы. Кислород является труднорастворимым газом, из-за малой растворимости в культуральных средах и относительно большой скорости потребления кислорода, что определяется заданным удельным съемом продукции (биомассы), при определенных условиях кислород может выступать как лимитирующий субстрат. Требуется более глубокое изучение самого процесса и совершенствования его математических моделей.

Для выяснения механизма поступления питательных веществ, в т.ч. кислорода, в клетку, обычно анализируется каждая стадия фазового перехода и переноса массы. Т.е. используется прием хорошо известный в процессах основной химической технологии. При этом стадия с наибольшим сопротивлением является лимитирующей и определяет скорость протекания всего процесса. В работах Самсонова В.В. показано, что в процес-

сах выращивания продуцентов кормового белка чаще всего лимитирующей стадией является массопередача кислорода из газовой фазы в жидкую.

Решающая роль скорости растворения кислорода в достижении заданной производительности ферментатора при выращивании кормовых дрожжей подтверждена [1, 4]. Ранее отмечалось [6], что в условиях интенсивного перемешивания ($N_v > 2 \text{ кВт м}^{-3}$) достигаемая скорость растворения кислорода $M > 2 \text{ кВт м}^{-3} \text{ч}^{-1}$.

Процесс массопередачи кислорода может быть разделен на диффузионную часть в газо-жидкостных пленках и на внутриклеточную необратимую биохимическую реакцию, которая зависит от количества кислорода поступающего из газовой фазы в жидкую среду на жизнедеятельность микроорганизмов.

В 1970–1980 гг. появились работы, в которых отмечают, что влияние перемешивания «через кислород» не может рассматриваться как универсальный механизм, объясняющий все известные экспериментальные данные [2, 3]. Это направление исследований в нашей стране получило наиболее широкое развитие в работах В.В. Кафарова, Л.С. Гордеева, С.Ю. Юрьевича, В.В. Самсонова. Суть влияния перемешивания заключается в том, что при выращивании мицелиальных культур, актиномицетов и т.п. в вязких культуральных средах возникают полужесткие колонии – агломераты, состоящие из многих микроорганизмов, не связанных с гифами, а находящихся вместе из-за отсутствия относительно движения слоев жидкости, в которой находятся микроорганизмы. При этом процесс доставки кислорода и питательных веществ к клеткам агломератов осуществляется с

меньшей скоростью, чем к отдельно существующим клеткам, находящимся вне агломерата, что в конечном итоге приводит к снижению производительности ферментатора. Понятие степени сегрегации связано с концепцией «жидких частиц». Согласно этой концепции жидкость, поступающая в реактор, диспергируется на «жидкие частицы», каждая из которых функционирует как самостоятельная система. Предполагается, что объем «жидкой частицы» достаточно мал по сравнению с реакционным объемом, но достаточно велик, чтобы содержать в себе большое количество мельчайших частиц (молекул). Молекулы, составляющие частицу, остаются в ней в течение времени ее пребывания в реакторе. Если состояние жидкости соответствует этим условиям, то жидкость считают полностью сегрегированной. Степень сегрегации в этом случае равна 1. Если жидкость, поступающая в реактор, полностью перемешивается на микроуровне, что имеет место в моделях аппаратов идеального смешения, то в этом случае степень сегрегации равна 0.

Следует отметить, что отсутствие точных математических моделей макрокинетики процесса биосинтеза кормового белка и сложные математические описания структуры потоков в ферментаторах пока не позволяют в достаточной степени использовать это интересное направление в практической работе при расчете и конструировании ферментаторов. Кроме того, коэффициенты предложенных математических моделей определяются экспериментально, что не позволяет прогнозировать условия перемешивания в промышленном аппарате без проведения исследований. С достаточной уверенностью можно полагать, что при высокой интенсивности растворения кислорода, для достижения которой требуется значительная мощность на перемешивание, степень сегрегации близка к 0, так как аппарат приближается к модели идеального перемешивания [4, 5]. Это также установлено как при исследовании промышленных ферментаторов с рабочей вместимостью до 400 м³ для производства БВК, так и при исследовании опытных моделей вместимостью 1...15 м³. Поэтому учитывать явление сегрегации жидкости в аппаратах интенсивного массообмена с большой удельной мощностью на перемешивание (2...10 кВт*м⁻³) не следует. При достижении высокой интенсивности растворения кислорода, заведомо будет обеспечена высокая степень перемешивания жидкой фазы по структуре потока близкой к модели идеального перемешивания. Кратность циркуляции в таких аппаратах мо-

жет достигать величины 60...400 ч⁻¹. Хотя, конечно могут быть неудачные конструкции ферментаторов, в которых образуются застойные зоны, и, соответственно, могут появиться агрегаты микроорганизмов. Условия, способствующие появлению агломератов, наиболее присущи процессам выращивания микроорганизмов в ферментаторах на вязких культуральных средах и где не требуется высокая интенсивность процесса перемешивания и массообмена (производство ферментов, медпрепаратов). В настоящее время одной из главных задач конструкторов является разработка аппарата, который обеспечивает заданную скорость растворения кислорода, механическую надежность и долговечность при минимальных затратах. Различают несколько режимов движения газожидкостных потоков. При скорости газа менее 0,1 м*с⁻¹ режим течения принято называть пузырьковым (гомогенным). С увеличением скорости газа и скорости жидкости газожидкостная смесь состоит из пузырьков различных размеров, заполняющих весь объем барботажной трубы. Этот режим принято называть пенным (гетерогенным). При увеличении скорости газа более 10 м*с⁻¹ пенный режим переходит в стержневой, при котором этот тип аппаратов не работает.

Газосодержание и скорость жидкой фазы является важнейшими характеристиками газожидкостного потока, т.к. оказывают существенное влияние на циркуляцию жидкости и скорости циркуляции среды.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовать процесс протекания процесса культивирования микроорганизмов в биотехнологическом оборудовании – ферментаторе, а именно подвод кислорода в питательную среду.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность протекания биотехнологического процесса в ферментаторе зависит от совокупности взаимодействующих конструктивных и технологических параметров и среды, условиями проникновения питательных компонентов к поверхности микроба, условиями отвода продуктов метаболизма, степенью аэрации и др. Основной характеристикой эффективности работы ферментатора являются рост микроорганизмов и выход биомассы, выражающийся производительностью установки. Обычно, при проектировании ферментаторов, как и любого другого аппа-

РОЛЬ КИСЛОРОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АППАРАТА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

рата, задаются их производительностью и затем определяют оптимальные параметры. Решение такой задачи возможно лишь в том случае, когда имеется зависимость производительности ферментатора от основных параметров ее определяющих.

На рисунке 1 приведен аппарат для культивирования микроорганизмов [1], на рисунке 2 приведен новый способ подвода кислорода в аппарат [7], внедрение которого не только решает проблему кислородонасыщения, но и решает проблему увеличения полезного рабочего объема аппарата.

Искусственно созданный гидродинамический режим в аппарате для культивирования микроорганизмов оказывает существенное влияние на скоростной режим протекания химических, тепловых и массообменных процессов.

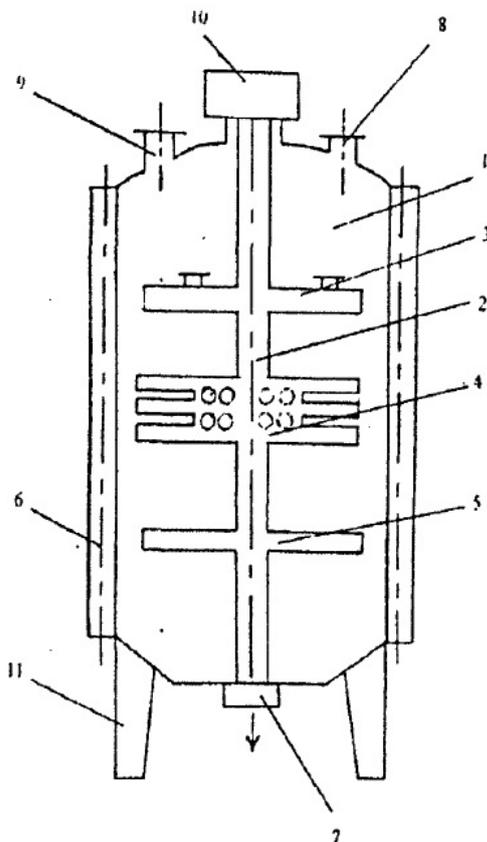


Рисунок 1 – Аппарат для культивирования микроорганизмов:

- 1 – корпус; 2 – вал; 3 – верхнее перемешивающее устройство;
- 4 – центральная мешалка;
- 5 – нижняя мешалка; 6 – теплообменная рубашка; 7, 8, 9 – патрубки;
- 10 – электродвигатель; 11 – основание

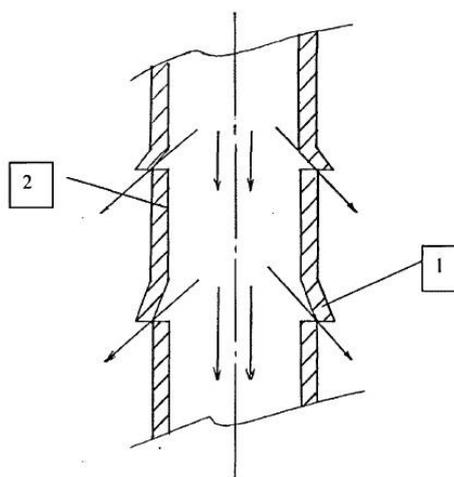


Рисунок 2 – Схема полого вала с жалюзийными отверстиями для выхода воздуха в питательную смесь
1 – стенка вала; 2 – отверстия в валу;
→ – направление воздуха

Основными конструктивными элементами данных аппаратов для культивирования являются системы перемешивания культуральной среды и газораспределения по всему объему аппарата.

Для экспериментальных данных (в диапазоне переменных: $V_p = 1.1 \dots 11.1 \text{ м}^3$; $d_m = 0.18 \dots 0.56 \text{ м}$; $D = 0.8 \dots 2.5 \text{ м}$; $d_v/D = 0.2 \dots 0.3$; $v_v = (8.33 \dots 33.3) 10^{-3} \text{ М}^3/\text{М}^3 \text{ с}$; $n = 3 \dots 12 \text{ об/с}$; $m_{\text{я}} = 1 \dots 4$ методом наименьших квадратов были получены зависимости объемного коэффициента массопередачи от конструктивных параметров и режимов работы реактора с числом ярусов перемешивающего устройства $m_{\text{я}} \leq 4$. На графиках 1–3 представлены зависимости концентрации кислорода от типа перемешивающего устройства.

Для аппаратов с одной многоярусной мешалкой:

$$K_L a = 0.8 N_V^{0.53} N^{0.2} M_{\text{я}}^{0.47} d_m / D^1, \text{ С}^{-1}.$$

Для аппарата с тремя многоярусными мешалками:

$$K_L a = 0.8 N_V^{0.53} N^{0.2} M_{\text{я}}^{0.47} (D_M) / D, \text{ С}^{-1}.$$

Для полученных экспериментальных данных был рассчитан $K_L a$ по зависимостям, предложенной японскими исследователями:

$$K_n = 10^{-6} (2.40 + 3.35 N_{\text{я}}) N_y^{0.56} v_e^{0.7} n^{0.9},$$

где K_n – объемный коэффициент сорбции кислорода;

$N_{\text{я}}$ – число ярусов мешалки;

N_y – удельная энергия на механическое перемешивание;

v_e – фиктивная линейная скорость газа;

n – число оборотов мешалки в минуту [3].

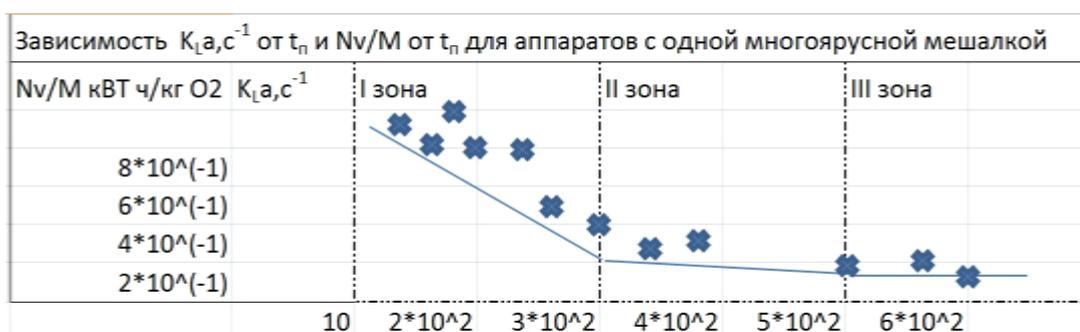


График 1 – Зависимость для аппаратов с одной многоярусной мешалкой



График 2 – Зависимость для аппаратов с тремя многоуровневыми мешалками



График 3 – Зависимость. Показатель $Nv/M = f(t_n)$

Концентрация кислорода в культуральную жидкость в отходящем из ферментатора воздухе составляет 18... 20 %.

В аппаратах для культивирования микроорганизмов возникают пузырьковый, пенный, стержневой [4, 5, 7].

- Пузырьковый (с подводом кислорода) возникает при скоростях газа менее $0,05-0,1 \text{ м.с}^{-1}$. Здесь наблюдается примерно одинаковый размер пузырей, что способствует в свою очередь равномерное распределение частиц по всему объему аппарата для культивирования микроорганизмов;

- Пенный (гетерогенный, турбулентный), возникает при увеличенных значениях газа. В процессе культивирования микроорганизмов

возникает увеличенное и масштабное пенообразование на поверхности культивируемой жидкости, поверхность контакта фаз при этом режиме достигает максимума. Образование пены в свою очередь снижают показатели производства кормового белка. Обычно пенообразование на поверхности культивируемой жидкости устраняют при помощи химических реагентов, что вносит отрицательный характер в питательные ценности кормового белка. На данный момент уже существуют механические методы по устранению данного недостатка путем реконструкции ферментаторов, а именно аппарата новой конструкции [7], в данном оборудовании имеется трехъярусное перемешивающее устройство,

РОЛЬ КИСЛОРОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ АППАРАТА ДЛЯ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

верхнее перемешивающее устройство предназначено для устранения и гашения пенообразования по всей поверхности культуральной жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый подвод кислорода через полый вал и трехъярусное перемешивающее устройство обеспечивает наиболее интенсивное аэрирование питательной среды по всему объему культивируемой среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ производственно-технической деятельности заводов БВК Всесоюзного производственного объединения «Союзпромбелок» в IV квартале 1977 года : отчет / ВНИИсинтезбелок : научн. руководитель темы Катруш Р. В. – М., 1978. – 51 с.
2. Бирюков, В. В. Влияние масштаба сегрегации на процессы культивирования микроорганизмов / В. В. Бирюков // Микробиологическая промышленность. – 1975. – № 4. – С. 1–4.
3. Бирюков, В. В. Сравнительный анализ механизмов влияния перемешивания на биохимические процессы при культивировании микроорганизмов / В. В. Бирюков, А. Д. Штоффер // Микробиологическая промышленность. – 1970. – № 2. – С. 27–33.
4. Бойко, В. И. Исследование работы биохимического реактора с рассредоточенными по объему перемешивающими устройствами : дис. ... канд. техн. наук / Бойко В. И. – М., 1980. – 197., ДСП.
5. Вольфович, Д. И. Увеличение производительности дрожжей выращиваемых на парафинах путем повышения парциального давления O_2 : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Вольфович Д. И. – М., 1981. – 23 с.
6. Кузнецов, А. М. Ферментационная аппаратура для производства кормового белка : обзор / А. М. Кузнецов, В. Г. Усенко, В. И. Бойко. – М. : ОНТИТЭИмикробиопром, 1978. – 56 с., ДСП.
7. Федосеев, К. Г. Физические основы и аппаратура микробного синтеза биологических активных соединений / К. Г. Федосеев. – М. : Медицина, 1977. – 304 с.

Кокеева Галия Ергешевна, к.т.н., БИИК СибГУТИ, 670031, г. Улан-Удэ, ул. Трубочеева, дом 152, e-mail: kokievagalia@mail.ru, тел.: 89243993984.

Шагдыров Илья Баторович, д.т.н., ФГБОУ ВО БГСХА 670024, Россия, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, дом 8.

Шапошников Юрий Андреевич, д.т.н., профессор ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», тел.: 8-905-9870721, e-mail: u_Shaposhnicov@mail.ru.