

УДК 664

Тепло- и массообмен между клеткой и культуральной средой при аэробном культивировании хлебопекарных дрожжей

В.Б. ТИШИН, В.Г. ОГАННИСЯН, А.В. ЛЕОНОВ

tishinvb@mail.ru

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

На основе полуэмпирической теории турбулентного переноса и закон распада турбулентных пульсаций в четвертой степени в тепловых и диффузионных слоях, окружающих дрожжевые клетки, показана возможность решения проблемы тепло-и массообмена между клеткой и культуральной жидкостью.

Ключевые слова: тепломассообмен, дрожжи, аэробное культивирование.

Heat- and mass transfer between cells and culture medium for aerobic cultivation baker's yeast

V.B. TISHIN, V.G. OGANNISYAN, A.V. LEONOV

*National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics
Institute of Refrigeration and Biotechnologies
191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

On the basis of the semi-empirical theory of turbulent transport and the law decay of turbulent fluctuations in the fourth degree in the thermal and diffusion layers surrounding the yeast cell, the possibility of solving the problem of heat transfer and mass transfer between the cell and the culture fluid is shown.

Keywords: heat and mass exchange, yeast, aerobic cultivation.

Дрожжи относятся к гетеротрофным культурам, потребляющим в процессе своего развития органические вещества. При культивировании пекарских дрожжей чаще всего используются углеводы (сахара). Процесс культивирования ведётся в условиях интенсивной аэрации культуральной среды, особенно на товарной стадии процесса, с целью обеспечения дрожжевых клеток необходимым количеством кислорода. При этом в процессе культивирования выделяется значительное количество теплоты, которую необходимо постоянно отводить.

Известно, что интенсивность тепловыделений прямо пропорциональна интенсивности потребления клетками кислорода и не зависит от вида субстрата и микроорганизмов. Но так как кислород расходуется на поддержание жизнедеятельности клеток и их рост, то изменение удельных тепловыделений может быть выражено уравнением

$$q_b = ax + b \frac{dx}{d\tau}, \quad (1)$$

где q_b – удельное значение биологической теплоты, выделившейся в единице объема среды в единицу времени, или её можно назвать ещё удельной мощностью биологического источника теплоты N_b/V_p , Дж/(м³*с). Коэффициент a представляет собой количество теплоты, выделившейся при поддержании жизнедеятельности единицы биомассы в единицу времени, Дж/(кг*с); коэффициент b – количество теплоты, выделившейся при образовании новых клеток, отнесённых к единице биомассы, Дж/кг.

Первое слагаемое уравнения (1) играет преобладающую роль в стационарной фазе роста, когда основные тепловыделения связаны с поддержанием жизнедеятельности клеток и $ax \gg bdx/d\tau$. Второе слагаемое характеризует тепловыделения в фазе прироста биомассы, когда $ax \ll bdx/d\tau$. При расчёте теплообмена в культиваторах определяющую роль играет второе слагаемое.

Выделяющаяся теплота отводится от поверхности клеток культуральной жидкостью, которая затем охлаждается в теплообменнике.

В связи со сказанным представляет интерес решения задач теплообмена и массообмена между клетками и культуральной жидкостью.

Если теплообмен между культуральной жидкостью и теплопередающей поверхностью теплообменного устройства хорошо изучены, то процессы теплообмена и массообмена между культуральной средой и клеткой при аэробном и анаэробном культивировании микроорганизмов экспериментально и теоретически почти не исследованы. Причина сложившейся ситуации кроется в сложности постановки таких экспериментов из-за слишком малых размеров объектов исследования. В литературе встречаются публикации по тепло – и массообмену между одиночными частицами и омывающим их потоком жидкости [1], однако размеры этих частиц на несколько порядков выше размеров клеток микроорганизмов, а условия проведения экспериментов далеки от условий в культиваторах.

В работе [1] приводятся критериальные уравнения для расчёта коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи вида,

$$Nu = 2 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33}, \quad (2)$$

Критерий Рейнольдса определяется через скорость движения частиц относительно жидкости. Для расчёта относительной скорости приводятся специальные уравнения, вид которых зависит от конструкции аппарата.

Согласно уравнению (2) при $Re \rightarrow 0$ $Nu \rightarrow 2$, т.е. при относительной скорости равной нулю будет иметь место только молекулярный перенос теплоты или массы. Следует учесть, что при проведении экспериментов, с целью нахождения коэффициентов пропорциональности и показателей

степени в уравнении (2), размеры частиц позволяли определять их величину непосредственным измерением. Необходимо помнить также, что в указанных работах размеры частиц значительно больше размеров клетки и применять их к последним следует с большой осторожностью.

В связи указанными обстоятельствами представляет интерес полуэмпирического метода решения поставленной задачи. В основу решения положены известная трёхслойная модель турбулентного потока и закон четвёртой степени затухания турбулентных пульсаций в тепловом или диффузионном слое, окружающем клетку.

Из-за отсутствия экспериментальных данных по теплообмену и массообмену между клеткой и жидкостью, предлагаемый метод полуэмпирического решения задачи по нахождению коэффициентов переноса будет носить лишь оценочный характер. Однако он позволит провести сравнительный анализ теоретического решения с имеющимися в литературе экспериментальными данными по тепло и - массообмену с объектами более крупных масштабов.

Согласно полуэмпирической теории турбулентного переноса уравнения для определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в безразмерной форме можно представить в следующем виде [2]

$$Nu_k = \frac{\alpha_k d_k}{\lambda} = 2\eta_m \frac{Pr}{\bar{\psi}}, \quad (3)$$

$$Nu_D = \frac{\beta_k d_k}{D} = 2\eta_m \frac{Pr_D}{\bar{\psi}_D}, \quad (4)$$

где d_k – диаметр клетки; $\bar{\alpha}_k$ и $\bar{\beta}_k$ – средние значения коэффициентов теплообмена и массообмена между поверхностью клетки и окружающей её средой; λ и D – коэффициенты теплопроводности и молекулярной диффузии соответственно; Pr и Pr_D – тепловой и диффузионный критерий Прандтля; $\bar{\psi}$ – средняя безразмерная разность температур между жидкостью и поверхностью клетки, $\bar{\psi}_D$ – средняя безразмерная разность концентрации субстрата в жидкости и у поверхности клетки.

Малый размер клеток определяет и масштаб турбулентных пульсаций, которые могут проникнуть к поверхности клетки через окружающий её тепловой и диффузионный слой. Их размер должен быть меньше размера клетки, в противном случае клетки турбулентными пульсациями будут просто перемещаться в пространстве из одной точки в другую, и интенсификации процессов обмена между средой и клеткой не произойдёт.

Максимальный масштаб турбулентных пульсаций, которые могут проникнуть в пределы теплового или диффузионного слоя и

способствовать его турбулизации, а, следовательно, интенсификации тепло-массообмена между клеткой и средой, вычислим по уравнению

$$\eta_m = \frac{u_* d_k \rho}{2\mu}, \quad (5)$$

где u_* – динамическая скорость; μ – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Выбор уравнения для расчёта динамической скорости зависит, во-первых, от типа культиватора и, во-вторых, от метода культивирования (аэробное оно или анаэробное).

Рассмотрим для примера аэробное культивирование пекарских дрожжей в барботажном культиваторе колонного типа. Жидкой средой, окружающей клетку, будет служить культуральная жидкость, т.е. вода с растворёнными в ней субстратом, солями и продуктами метаболизма. Источником турбулентности служит движение воздуха относительно культуральной жидкости. В барботажных культиваторах колонного типа приведённая скорость воздуха редко превышает 0,1 м/с, поэтому в дальнейших расчётах ограничимся этой величиной. Для определения динамической скорости в равенстве (5) воспользуемся уравнением [3], которое для случая тепло – массообмена между жидкостью и клеткой приводится к виду

$$u_* = 2.24 \sqrt{\rho_{\text{ж}} g w_{\text{г}}}, \quad (6)$$

где $w_{\text{г}}$ – приведённая скорость воздуха

Теплообмен между клеткой и культуральной средой. Среднюю безразмерную разность температур $\bar{\psi}$ в уравнении (3) согласно трёхслойной модели затухания турбулентных пульсаций найдём по уравнению [3]

$$\bar{\psi} = \frac{\text{Pr}}{\eta_m} \left(\int_0^{\eta_m} \left(\int_0^6 \frac{d\eta}{1 + \text{Pr}(0,124 \eta)^4} + \int_6^{30} \frac{d\eta}{1 + \text{Pr}(0,2 \eta - 1)} + \int_{30}^{\eta} \frac{d\eta}{1 + \text{Pr}(0,4 \eta - 1)} \right) d\eta \right), \quad (7)$$

где $\eta = \rho u_* y / \mu$ – безразмерная координата; y – расстояние от поверхности клетки до произвольной точки в жидкости.

При культивировании дрожжей диаметр клеток колеблется в пределах 5 – 10 мкм. При столь малых размерах клеток максимальный масштаб турбулентности клетки η_m , вычисленный по уравнению (5) не превышает 6. В таком случае в уравнении (7) исчезают два последних слагаемых и уравнение (7) примет вид.

$$\bar{\psi} = \frac{\text{Pr}}{\eta_m} \left(\int_0^{\eta_m} \left(\int_0^{\eta} \frac{d\eta}{1 + \text{Pr}(0,124 \eta)^4} \right) d\eta \right), \quad (8)$$

Результаты расчётов теплового критерия Нуссельта по уравнениям (3), (5), (6) и (8) представлены на рис. 1. Средний диаметр клетки примем равным 7 мкм, коэффициент теплопроводности культуральной среды $\lambda = 0,58 \text{ Вт/м } ^\circ\text{К}$ [4]. Температура культивирования дрожжей принята равной $30 \text{ }^\circ\text{С}$.

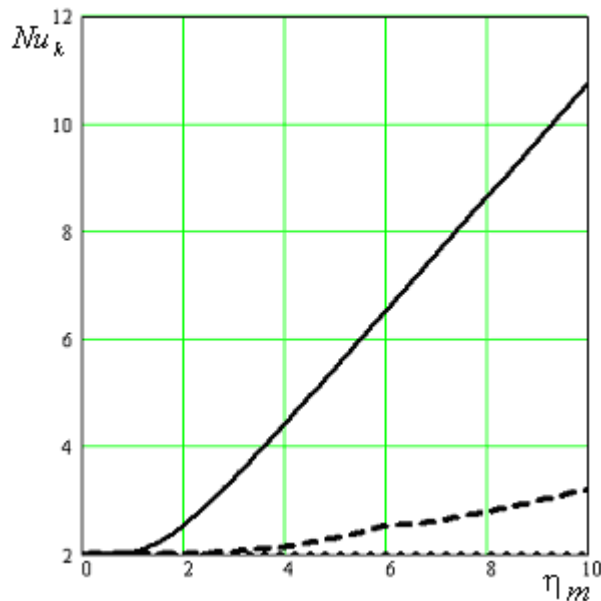


Рис.1. Зависимость Nu от η_m
 — Nu_D ; - - Nu_k
 $Nu = 2$

Из рис. 1 видно, что при $\eta_m \rightarrow 0$, отношение $\eta_m \text{Pr}/\bar{\psi} \rightarrow 1$, тепловой критерий Нуссельта стремится к 2 и коэффициент теплоотдачи α_k — к определённой величине, что находится в полном соответствии с уравнением (2). Такой результат даёт основание рекомендовать полуэмпирический метод для решения задач теплообмена между культуральной средой и клетками.

Вычисленные по уравнению (3) коэффициенты теплоотдачи α_k , при $\eta_m \leq 6$, меняются незначительно и имеют высокие численные значения. Таким образом, теплообмен между культуральной средой и клеткой не является лимитирующей стадией при переносе теплоты к хладоносителю, что подтверждается практикой культивирования.

Вопрос о том, будут ли реальные значения α_k совпадать с вычисленными по уравнению (3), остаётся пока открытым.

Массообмен между клеткой и культуральной средой. Процесс массообмена между клеткой и жидкостью описывается уравнением (4). Принципиально оно отличается от уравнения (3) только заменой в нём

коэффициента теплопроводности на коэффициент молекулярной диффузии D .

Рассмотрим конкретный пример массообмена между дрожжевой клеткой и мелассным раствором с содержанием сахарозы 10 масс. % в барботажном аппарате колонного типа. В качестве потребляемого клеткой вещества возьмём кислород. Ввиду отсутствия исследований по диффузии кислорода в дрожжевой бражке, воспользуемся справочными данными по диффузии кислорода в водных растворах сахарозы. Подобное упрощение состава жидкой среды несколько снижает точность расчётов, однако для оценочных выводов вполне допустимо. Согласно работе [5] коэффициент молекулярной диффузии $D_{O_2} = 1,74 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Плотность и вязкость бражки брались из работы [4] при $T = 30^\circ\text{К}$. При принятых условиях диффузионное число Прандтля $Pr_D = 589$. Расчёт динамической скорости и масштаба турбулентности ни чем не отличается от предыдущей задачи. Зависимость диффузионного критерия Nu_D от масштаба η_m в графическом виде представлена на рис. 1.

Из рис.1 видна полная аналогия в зависимости тепловых и диффузионных критериев Нуссельта от масштаба турбулентности. Удивительного в этом ни чего нет, так как уравнения, описывающие их, получены из одних и тех же посылок.

К сожалению, подтвердить, или опровергнуть, уравнения (3) и (4) опытными данными не представляется возможным по причине отсутствия таковых. И всё же полученные из уравнения (4) значения коэффициентов массообмена интересно сравнить с результатами исследований по массообмену при растворении гранул мочевины в растворе глицерина в лабораторных ферментёрах, где источником турбулентности служили мешалками [6].

Диффузионный критерий Нуссельта будем рассчитывать по уравнению (4). По мнению авторов работы [6], и с этим мнением можно согласиться, Nu_D не зависит от вида субстрата и продукта метаболизма. Последнее даёт нам право использовать приведенные ими численные значения Nu_D для расчёта β_k из уравнения (4), подставив в него размер клетки и коэффициент молекулярной диффузии D_{O_2} . Численные значения Nu_D в зависимости от условий перемешивания лежат в пределах от 3.7 до 14. При выбранном нами размере клетки и коэффициенте D_{O_2} получим значения β_k , лежащие в пределах от 0.00092 до 0.00348 м/с. Эти значения β_k соответствуют изменению η_m примерно от 4 до 15, что находится в близком соответствии с выполненными расчётами. Таким образом, в определённой мере, подтверждается правильность рассмотренного нами

полуэмпирического метода решения задач массообмена между клеткой и окружающей её средой.

Безусловно, сравнение опытных данных по растворению мочевины с результатами расчётов коэффициентов массообмена между жидкостью и клеткой при потреблении ею кислорода несколько условно. Во-первых, потому, что размер частиц мочевины в тысячи раз больше размера клеток. Соответственно и масштаб турбулентных пульсаций η_m во столько же раз больше.

Во-вторых, расчёты по уравнению (4) были выполнены применительно к барботажным аппаратам, в которых источником турбулентности является движение воздуха относительно жидкости, а в опытах с мочевиной источником турбулентности служили мешалки. Поэтому уравнение (6) для аппаратов с мешалками примет иной вид. Однако все эти расхождения в данном случае не так уж и важны, поскольку нас интересует в первую очередь порядок величин.

С учётом всего сказанного ранее можно сказать, что уравнение вида (3) и (4) в целом правильно отражают закономерности теплообмена и массообмена между культуральной жидкостью и клеткой.

Список литературы

1. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидравлическое сопротивление. Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 366 с.
2. *Тишин В.Б.* Культивирование микроорганизмов. Кинетика, гидродинамика, тепломассообмен. – СПб., 2012. – 181 с.
3. *Соколов В.Н. Доманский И.В.* Газожидкостные реакторы.– Л.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
4. *Шишацкий Ю.И.* Справочник: Производство хлебопекарных дрожжей, Пищ. пром. 1990. – 201с
5. *Новосёлов А. Г., Тишин В.Б., Дужий А.Б.* Справочник по молекулярной диффузии. Новый справочник химика и технолога, ч. 2, Процессы и аппарата химических технологий. – СПб.: НПО "Профессионал", 2006, с. 783 – 909.
6. *Бирюков В.А. Кантере В.М.* Оптимизация периодических процессов микробиологического синтеза. – М.: Наука, 1985. – 292 с.