УДК 66.067.38.62

АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ МИКРОФИЛЬТРАЦИИ ПИВА

© А.И. Ключников, А.Н. Пономарев, К.К. Полянский

Ключевые слова: мембраны; концентрационная поляризация; мембранный аппарат; инженерные расчеты; гидродинамические параметры; нефильтрованное пиво.

Существующая информация, касающаяся инженерной методики расчета процесса микрофильтрации пива, в ряде случаев связана с отсутствием данных об отдельных параметрах процесса и невозможностью их определения. Представленное теоретическое описание процесса позволяет провести оценку уровня концентрационной поляризации на поверхности мембраны и выявить технические приемы, направленные на ее снижение.

Одной из основных задач, которые предстоит решать в ближайшем будущем, является овладение новыми механизмами процессов селективной проницаемости мембран и выявление на этой основе новых закономерностей, позволяющих в конечном итоге проводить технологический расчет и проектирование мембранных аппаратов и установок без постановки физического эксперимента. В этой связи большое значение приобретают исследования, направленные на выявление влияния внешних параметров (например, гидродинамических) на селективность и проницаемость мембран, поскольку они не только отвечают на вопрос, для каких целей и в каких интервалах переменных может быть наиболее оптимально использован данных метод, но и помогают полнее раскрыть сущность мембранных процессов.

Проведем анализ процесса образования белкового слоя на поверхности мембраны. Для этого рассмотрим дрожжевую клетку на границе «неосветленное пиво – белковый слой» (рис. 1). На дрожжевую клетку, находящуюся в объеме пива, действуют: P – давление, действующее на клетку, находящуюся в пиве на высоте h;

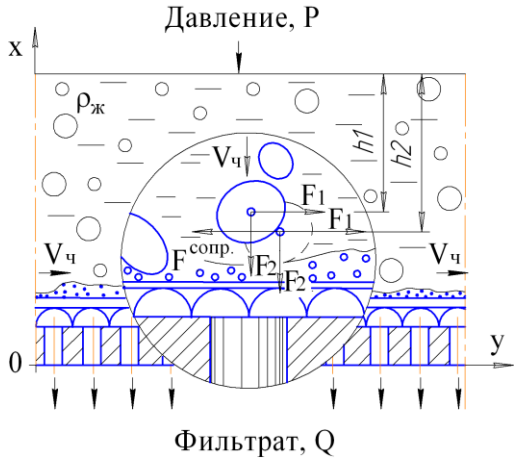

Рис. 1. Схема сил, действующих на дрожжевую клетку на границе «неосветленное пиво – белковый слой»

F_1 – сила, действующая на клетку в направлении потока, движущегося тангенциально мембране со скоростью V_n; F_2 – сила, действующая на клетку в направлении, перпендикулярном поверхности мембраны, и вызываемая физическими свойствами осветляемого продукта; $F_{\text{сопр.}}$ – сила сопротивления, вызываемая движением клетки по белковому слою под действием тангенциального потока.

Для анализа концентрационной поляризации особый интерес представляет случай, когда дрожжевая клетка уже вошла в основную массу белкового слоя, поэтому можно определить его сопротивление и высоту.

В работах Ю.И. Дытнерского [1] для описания мембранных процессов используется уравнение Дарси:

$$V_{\text{ф}} = \frac{\Delta P - \Delta\pi}{\mu_{\text{ф}} R_{\text{ф}}}, \qquad (1)$$

где ΔP, $\Delta\pi$ – разность гидростатических и осмотических давлений по обе стороны мембраны соответственно; $\mu_{\text{ф}}$ – динамическая вязкость осветленного пива; $R_{\text{ф}}$ – сопротивление прониканию фильтрата.

Примем допущение $\Delta\pi = 0$ на основании того, что разность осмотических давлений исходного продукта и фильтрата незначительна и при расчетах ей часто пренебрегают [2].

Из теории классического фильтрования известно, что сопротивление прониканию фильтрата складывается из суммы сопротивлений фильтрующей перегородки (в нашем случае мембраны) и образуемого слоя осадка $R_{\text{о}}$ [3].

С учетом вышесказанного можно записать:

$$V_{\text{ф}} = \frac{\Delta P}{\mu_p \left(R_{\text{ф.п.}} + R_{\text{о}}\right)}. \qquad (2)$$

Из уравнения (2) вытекает утверждение об уменьшении производительности мембранного процесса (удельной скорости) при увеличении сопротивления образуемого осадка при постоянном значении величи-

ны $R_{ф.п.}$, которую можно определить при фильтрации дистиллированной воды с динамической вязкостью $\mu_в$.

$$R_0 = \frac{\Delta P}{V_ф \mu_ф} - \frac{\Delta P}{V_{д.в.} \mu_в}. \quad (3)$$

Определив константы проницаемости используемых мембран опытным путем, можно окончательно получить выражение для интересующей нас величины:

В другом случае сопротивление осадка R_0 можно представить в виде:

$$R_0 = R_0^{выс.} h_0, \quad (4)$$

где $R_0^{выс.}$ – сопротивление осадка по высоте; h_0 – высота слоя осадка.

Уравнение (2) можно переписать в виде:

$$V_ф = \frac{\Delta P}{\mu_р \left(R_{ф.п.} + R_0^{выс.} h_0 \right)}, \quad (5)$$

где $\mu_р$ – динамическая вязкость исходного продукта.

Полученное уравнение не включает параметры (за исключением величины ΔP), которыми можно было бы воздействовать на высоту образуемого слоя h_0 при помощи технических мероприятий. Для их выяснения вернемся к рисунку, делая при этом допущение, что образуемый осадок состоит из частиц, находящихся в равновесном состоянии.

Запишем выражения сил, действующих на рассматриваемую дрожжевую клетку белкового слоя.

Сила, действующая на дрожжевую клетку в направлении осветляемого потока, движущегося тангенциально мембране со скоростью V_n:

$$F_1 = \frac{\rho_{сл.} V_n h_1 S_{пов.}}{t} = k_1 V_n, \quad (6)$$

где $\rho_{сл.}$ – плотность белкового слоя; h_1 – высота от точки приложения силы до уровня разделяемого продукта; $S_{пов.}$ – площадь действия прилагаемой силы; t – время действия.

Сила, действующая на дрожжевую клетку в направлении, перпендикулярном поверхности мембраны, и вызываемая физическими свойствами продукта:

$$F_2 = \frac{\rho_{пр} V_ф h_2 S_{пов.}}{t} = k_2 V_ф, \quad (7)$$

где $\rho_{пр}$ – плотность продукта; h_2 – высота от точки приложения силы до уровня разделяемого продукта.

Сила сопротивления, вызываемая движением дрожжевой клетки по белковому слою под действием тангенциального потока:

$$F_{сопр.} = k_3 F_2. \quad (8)$$

Решая задачу статики, получим:

$F_{сопр.} = F_1$, откуда следует $k_2 k_3 V_ф = k_1 V_n$. (9)

Выражая из уравнения (9) величину $V_ф$, получим:

$$V_ф = \frac{k_1}{k_2 k_3} V_n. \quad (10)$$

С учетом выражений (5) и (10) получим равенство:

$$k_1 V_n = \frac{k_2 k_3 \Delta P}{\mu_р \left(R_{ф.п.} + R_0^{выс.} h_0 \right)}. \quad (11)$$

Откуда высота осадка h_0 на поверхности мембраны определится:

$$h_0 = \frac{k_2 k_3 \Delta P}{k_1 V_n \mu_ф R_0^{выс.}} - \frac{R_{ф.п.}}{R_0^{выс.}}. \quad (12)$$

Величина тангенциальной скорости потока V_n, в соответствии с законами гидравлики, является функциональной зависимостью и зависит главным образом от режима течения Re разделяемого потока и геометрических размеров мембранного канала.

$$V_n = \frac{d_{экв.} V_n^{max}}{A}, \quad (13)$$

где $d_{экв.}$ – эквивалентный диаметр дрожжевой клетки; A – геометрический размер мембранного канала.

С учетом этого выражение (12) перепишется в виде:

$$h_0 = \frac{k_2 k_3 A \Delta P}{k_1 d_{экв.} V_n^{max} \mu_ф R_0^{выс.}} - \frac{R_{ф.п.}}{R_0^{выс.}}. \quad (14)$$

Полученное уравнение позволяет сделать вывод о том, что при увеличении величины тангенциальной скорости разделяемого потока и уменьшении геометрического размера мембранного канала наблюдается уменьшение уровня концентрационной поляризации на поверхности мембраны.

Перечисленные параметры процесса, в т. ч. и величина ΔP, позволяют воздействовать на уровень концентрационной поляризации в аппарате за счет применения различного рода технических мероприятий. Качественное и эффективное воздействие возможно только при внимательном подборе величин рабочего давления и тангенциальной скорости, т. к. при микрофильтрации пива на поверхности мембраны должно присутствовать некоторое количество дрожжевых клеток, образующее защитный слой, который препятствует быстрой блокировке пор [3].

Использование информации, касающейся инженерного расчета способов мембранной обработки биологических жидкостей, в ряде случаев связано с отсутствием данных об отдельных параметрах процесса и невозможностью их определения. Представленное теоретическое описание процесса позволяет провести его оценку и выявить технические приемы, направленные на повышение эффективности способов мембранной обработки.

Основными факторами, оказывающими влияние на проницаемость и селективность мембранной фильтрации,

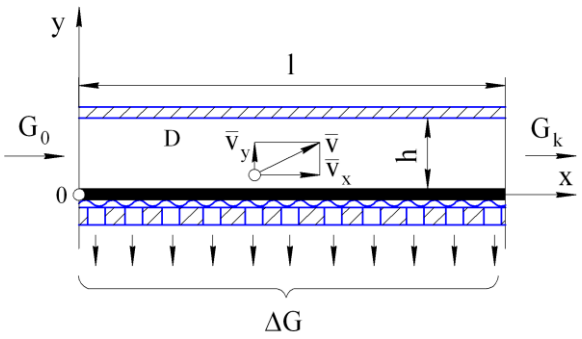

Рис. 2. Схема рассматриваемого мембранного канала

являются рабочее давление разделяемого потока, величина скорости, температура, физико-химические свойства и концентрация исходного раствора.

Рассмотрим мембранный канал длиной l и высотой h, по которому движется поток разделяемой жидкости с заданным расходом G_0. Пусть давление исходного раствора на входе в мембранный канал составляет величину P_H, а на выходе – P_K (рис. 2).

На основании вышесказанного величина разности давлений ΔP разделяемого раствора на входе и выходе мембранного канала определится:

$$\Delta P = P_H - P_K = \lambda \frac{V^2 l}{2d_г}, \qquad (15)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; V – средняя скорость потока жидкости; $d_г = 4S/P \approx h$ – гидравлический радиус мембранного канала.

Выполняя преобразования выражения (15) с учетом зависимости $\lambda = f(\mathrm{Re})$, можно записать:

$$\Delta P = f(\mathrm{Re}) \frac{V^2 l}{2h}. \qquad (16)$$

Исходя из условия осуществимости процесса мембранной фильтрации $P_K > \pi_р$, условие (16) перепишется в следующем виде:

$$P_H - \pi_P = f(\mathrm{Re}) \frac{V^2 l}{2h}. \qquad (17)$$

Уравнение (17) справедливо как для ламинарного, так и для турбулентного режимов движения. Однако в случае турбулентного режима движения выражение для коэффициента гидравлического трения λ не может быть получено теоретически из-за сложности его структуры. И если в случае ламинарного режима движения жидкости особых трудностей не возникает, коэффициент λ = 64/Re, то при турбулентном режиме необходимо проведение физического эксперимента. В результате обобщения опытных данных [4], полученных при движении жидкости в трубопроводах с гладкими стенками в пределах числа Рейнольдса Re = 4000–100000, получена зависимость вида:

$$\lambda = \frac{0{,}316}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}. \qquad (18)$$

С учетом вышеизложенного в случае ламинарного режима движения условие эффективности процесса мембранной обработки запишется в виде:

$$P_H - \pi_P > \frac{32 \nu G_0 l}{\rho S h^2}, \qquad (19)$$

где ν – кинематическая вязкость разделяемого раствора; ρ – плотность разделяемого раствора; S – площадь поперечного сечения мембранного канала.

Аналогично условие эффективности процесса мембранной обработки для турбулентного режима движения будет выглядеть следующим образом:

$$P_H - \pi_P > \frac{0{,}158 G_0^{1{,}75} l \nu^{0{,}25}}{(\rho S)^{1{,}75} h^{1{,}25}}. \qquad (20)$$

Единственным недостатком выражений (19) и (20) является то, что в них отсутствует составляющая, учитывающая гидравлическое сопротивление проникания фильтрата через мембрану. Для применимости этих условий при решении инженерных задач, связанных с расчетом процессов мембранной фильтрации, запишем следующее условие:

$$\Delta P = f(\mathrm{Re}) \frac{V^2 l}{2h} + R_{\mathrm{ПР}}, \qquad (21)$$

где $R_{\mathrm{ПР}}$ – гидравлическое сопротивление проникания фильтрата через мембрану.

В свою очередь, величину $R_{\mathrm{ПР}}$ можно представить в виде суммы сопротивлений самой мембраны $R_{\mathrm{М}}$ и слоя, образованного в результате концентрационной поляризации, осадка $R_{\mathrm{ОС}}$.

$$R_{\mathrm{ПР}} = R_{\mathrm{М}} + R_{\mathrm{ОС}}. \qquad (22)$$

Величина гидравлического сопротивления мембраны $R_{\mathrm{М}}$ определяется, прежде всего, ее структурными особенностями, знание которых, безусловно, имеет существенное значение при решении задач разработки количественной теории мембранных процессов и их успешной реализации на практике. Гидравлическое сопротивление осадка, обусловленного концентрационной поляризацией, зависит, главным образом, от физико-химических свойств пограничного слоя, а в случае мембранной обработки высокомолекулярных растворов – от процесса осадкообразования на поверхности мембраны.

При фильтровании чистого растворителя (обычно используется дистиллированная вода) можно опытным путем определить проницаемость мембраны – величину, необходимую для расчета гидравлического сопротивления мембраны:

$$R_{\mathrm{М}} = \frac{\Delta P' - \Delta \pi}{Q_{\mathrm{Д.В.}} \mu_{\mathrm{Д.В.}}}, \qquad (23)$$

где $\Delta P^{'}$, $\Delta\pi$ – разность гидростатических и осмотических давлений исходного раствора и фильтрата по обе стороны мембраны; $Q_{Д.В.}$ – проницаемость мембраны по дистиллированной воде; $\mu_{Д.В.}$ – динамическая вязкость дистиллированной воды.

Если осадок, образующийся на поверхности мембраны, рассматривать состоящим из частиц, находящихся в равновесном состоянии, то величину гидравлического сопротивления проникания фильтрата через слой можно выразить следующим образом:

$$R_{ОС} = \frac{72}{d_V}\eta_{ЭФ}\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^{8/3}}, \qquad (24)$$

где ε_0 – пористость мембраны; d_V – средний поверхностно-объемный диаметр частиц, образующих слой осадка на мембране; $\eta_{ЭФ}$ – эффективная вязкость осадка.

С учетом уравнений (22)–(24) получим следующее выражение:

$$\Delta P = f(\mathrm{Re})\frac{V^2 l}{2h} + \frac{\Delta P^{'} - \Delta\pi}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.}} + \frac{72}{d_V}\eta_{Э}\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^{8/3}}, \qquad (25)$$

решая которое относительно ΔP окончательно получим:

$$\Delta P = \frac{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.}\left[f(\mathrm{Re})\frac{V^2 l}{2h} + \frac{72}{d_V}\eta_{Э}\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^{8/3}}\right]}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1} - \frac{P_{Ф} + \Delta\pi}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1}. \qquad (26)$$

Аналогичным образом, с учетом условий (19) и (20), выражения для ламинарного и турбулентного режимов движения разделяемого потока запишутся в следующем виде:

$$P_H - \pi_p > \frac{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.}\left[\frac{32\nu G_0 l}{\rho S h^2} + \frac{72}{d_V}\eta_{Э}\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^{8/3}}\right]}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1} - \frac{P_{Ф} + \Delta\pi}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1}; \qquad (27)$$

$$P_H - \pi_p > \frac{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.}\left[\frac{0{,}158\nu^{0,25}G_0^{1,75} l}{(\rho S)^{1,75} h^{1,25}} + \frac{72}{d_V}\eta_{Э}\frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0^{8/3}}\right]}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1} - \frac{P_{Ф} + \Delta\pi}{Q_{Д.В.}\mu_{Д.В.} - 1}. \qquad (28)$$

Анализируя полученные уравнения (27) и (28), можно показать, что процесс непрерывного возрастания толщины осадка на поверхности мембраны можно предотвратить, увеличив, например, скорость циркуляции раствора или воздействием на его физико-химические свойства.

Для повышения скорости процесса мембранной фильтрации в ряде случаев возможно применение различных активаторов турбулентности (турбулизаторов): дисков, перпендикулярно расположенных траектории движения потока и размещенных по оси модуля, фторопластовых шариков и других приспособлений [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дытнерский Ю.И.* Баромембранные процессы. М.: Химия, 1986. 271 с.
2. *Дытнерский Ю.И.* Мембранные процессы разделения жидких смесей. М.: Химия, 1975. 229 с.
3. *Касаткин А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1971. 784 с.
4. *Пономарев А.Н., Ключников А.И., Полянский К.К.* Основные направления мембранных технологий при переработке молочной продукции: монография. Воронеж: Изд-во «Истоки», 2011. 356 с.

Поступила в редакцию 19 декабря 2011 г.

Klyuchnikov A.I., Ponomarev A.N., Polyanskiy K.K. ANALYSIS OF CONCENTRATION POLARIZATION IN THE COURSE OF BEER MICROFILTRATION

The existing information, concerning an engineering design procedure of process of a microfiltration of beer, in some cases, is connected with absence of the data about separate parameters of process and impossibility of their definition. The presented theoretical description of process allows to spend an estimation of level of concentration polarization on a surface of a membrane and to reveal the techniques directed on its decrease.

Key words: membranes; concentration polarization; membrane device; engineering calculations; hydrodynamics parameters; non-filtrated beer.