

УДК 66.067.38.661.515

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ КИНЕТИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ КРАХМАЛЬНО-ПАТОЧНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

© С.И. Лазарев, В.Л. Головашин, Ю.А. Ворожейкин

Ключевые слова: ультрафильтрация; мембрана; коэффициент задержания; удельная производительность. Проведены исследования по определению кинетических характеристик ультрафильтрационных мембран УАМ-150 и УПМ-К в зависимости от рабочего давления водного раствора крахмально-паточных производств. Выявлено изменение удельной производительности и коэффициента задержания при варьировании рабочего давления.

ВВЕДЕНИЕ

Ультрафильтрационное разделение водных растворов крахмально-паточных производств [1], содержащих взвешенные микрочастицы, такие как крахмал, клетчатка и т. п., сопряжено с рядом особенностей: на поверхности ультрафильтрационных мембран образуется динамический гель-слой, который существенным образом изменяет разделительные характеристики процесса – коэффициент задержания и удельный поток растворителя через мембраны. Данные величины плохо поддаются прогнозированию и математическому моделированию и зачастую определяются только экспериментальным путем, поэтому в данном исследовании проводилось выявление закономерностей влияния давления и концентрации растворенных веществ на коэффициент задержания и удельный поток растворителя через мембраны при очистке водных растворов крахмально-паточных производств от растворенных веществ с последующим использованием продуктов разделения во вторичных производствах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводились на установке, представленной на рис. 1 [2–3].

Установка работает следующим образом (рис. 1). Из расходной емкости (1), через систему вентилей высокого давления рабочий раствор нагнетается в камеру разделения плунжерным насосом НД-100/63 (2). Пройдя рабочую ячейку (3), дроссели (4) и поплавковые ротаметры (5), разделяемый раствор по шлангу возвращается в расходную емкость (1). Для сглаживания пульсаций давления и расхода в системе установлен ресивер (6), который представляет собой цилиндрический сварной сосуд ($V = 3,5$ л), предварительно заполняемый сжатым воздухом до давления, составляющего 30–40 % от рабочего, компрессором высокого давления (9). Давление в установке контролируется образцовым манометром (8), установленным до ячейки (3). Кроме измерительного манометра, в установке используется

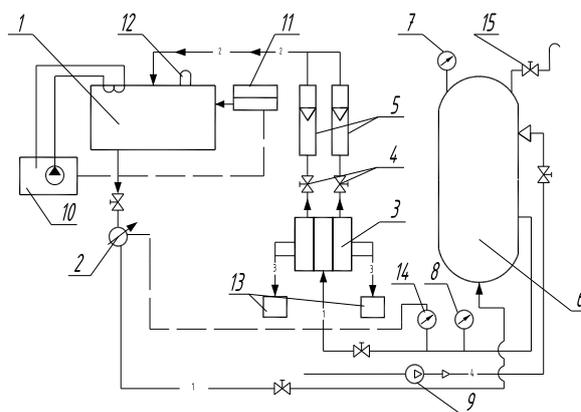


Рис. 1. Схема ультрафильтрационной установки

электроконтактный манометр (14), который при превышении давления в системе выше установленного значения отключает плунжерный насос (2) с помощью электроконтактного реле. Расход раствора задается регулированием рабочего хода плунжерного насоса (2). Жидкость, прошедшая в результате разделения сквозь мембраны, собирается в стеклянные емкости (13). Контроль и регулирование температуры в емкости (1) осуществлялись автоматически при помощи термостата (10), образцового термометра (12) и КСП (11). Сброс давления в системе осуществляется игельчатым вентилем (15). Все трубопроводы, плунжер насоса, игельчатые вентили, соприкасающиеся с исследуемыми растворами, были изготовлены из нержавеющей стали. Колебания давления и расхода на описанной установке не превышали 5 % от установленного значения.

Эксперименты по определению удельного потока растворителя проводились по следующей методике. Перед началом эксперимента собирали разделительный модуль, при этом мембрану располагали на прокладке (ватмане) активным слоем к разделяемому раствору. Затем ячейку (3) крепили на установке. Регулировкой

хода плунжера насоса (2) устанавливали рабочий расход и заполняли систему рабочим раствором. После этого устанавливали подачу воды в систему промывки сальников и охлаждения плунжера насоса. Затем при полностью закрытых дросселях (4) включали насос. По мере увеличения рабочего давления поднимали давление и проводили холостой опыт в течение 30 мин. Затем выключали установку, сбрасывали давление в системе. Собранный раствор из емкостей (13) сливали в емкость (1) и оставляли установку на несколько часов (обычно на ночь). После ночной выдержки раствор сливали из установки, перемешивали и заливали в емкость (1). Запускали установку, выводили на рабочий режим и проводили контрольный опыт в течение 4 часов. По окончании контрольного опыта собранный пермеат из емкостей (13) сливали в исходную емкость (1). Рабочий опыт проводился в течение 30 мин. Время опыта фиксировалось секундомером. После рабочего эксперимента сбрасывалось давление, установка отключалась. Замерялся объем собранного во время рабочего опыта пермеата. Затем по методикам [4] определялась концентрация растворенных веществ в исходной жидкости и пермеате.

Удельный поток растворителя рассчитывали по формуле (1):

$$G = \frac{V}{F \cdot \tau}, \quad (1)$$

где G – удельный поток растворителя, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; V – объем собранного пермеата, м^3 ; F – рабочая площадь мембраны, м^2 ; τ – время проведения эксперимента, с.

Затем по бихроматной окисляемости (ХПК) [4] определялась концентрация растворенных веществ в исходной жидкости и пермеате. Коэффициент задержания рассчитывался по формуле:

$$K = \left(1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{исх}}}\right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где R – коэффициент задержания, %; $C_{\text{пер}}$ – концентрация растворенного вещества в пермеате, $\text{кг}/\text{м}^3$; $C_{\text{исх}}$ – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результаты расчетных данных приведены на рис. 2а–г в виде зависимостей коэффициента задержания и удельной производительности от давления.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Давление, являясь движущей силой процесса ультрафильтрации, изменяет коэффициент задержания и удельный поток растворителя через мембраны. Рассмотрим влияние давления на коэффициент задержания. При увеличении давления коэффициент задержания мембран в исследуемом диапазоне давлений и данной

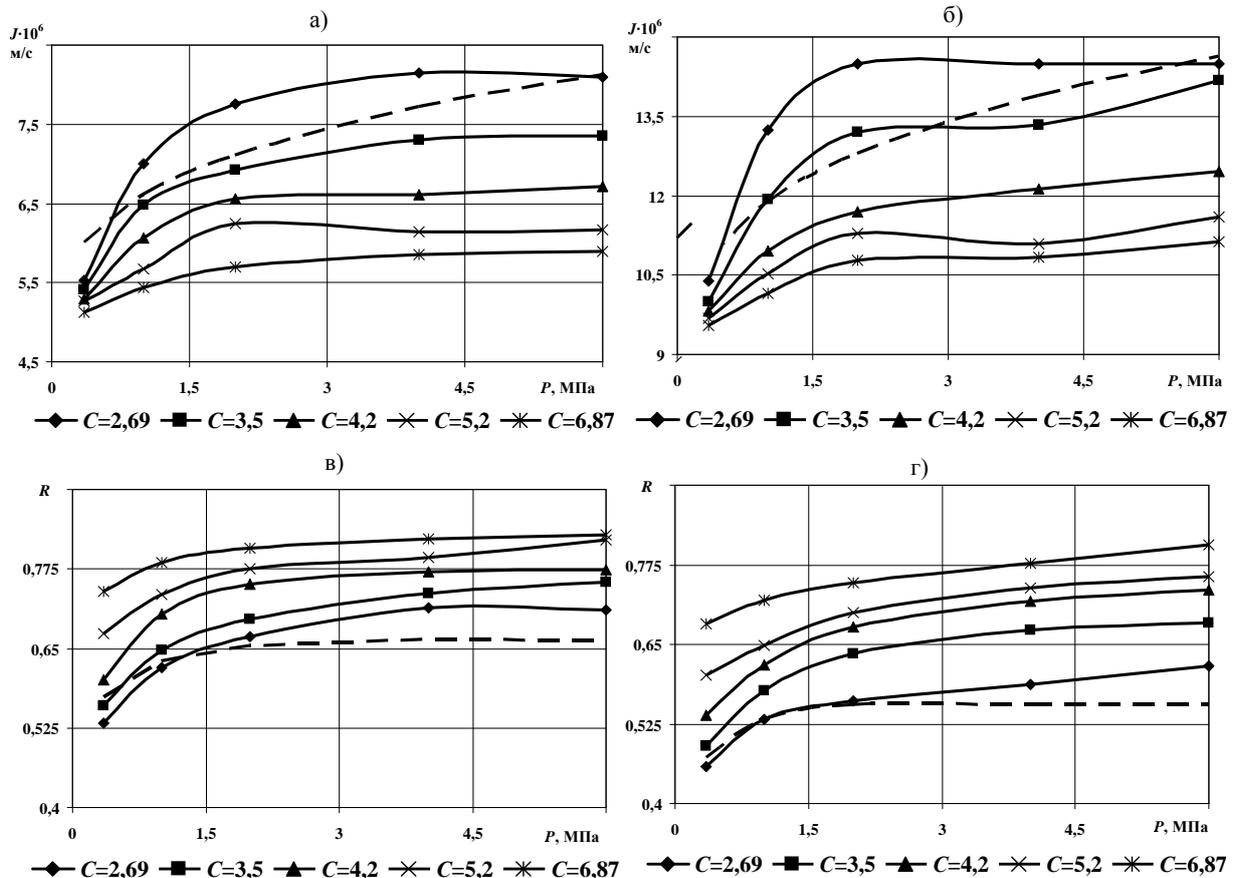


Рис. 2. Зависимость удельного потока растворителя (а – УАМ-150, б – УПМ-К) и коэффициента задержания (в – УАМ-150, г – УПМ-К) от концентрации и рабочего давления. Сплошная линия – эксперимент, штриховая – расчет при $C = 2,69 \text{ кг}/\text{м}^3$

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов в уравнении (4)

Мембрана	k_1	k_2	m	n	A_1
УПМ-К	-0,664	4,367	0,275	-0,3513	-1731,6
УАМ-150	-0,664	4,367	0,276	-0,3513	-2000,0

Таблица 2

Значения эмпирических коэффициентов k_1, k_2, k_3, G в уравнении (5)

Мембрана	k_1	G	k_2	k_3
УПМ-К	588	1,3245	0,00004	0,0010
УАМ-150	3500	0,6351	0,00004	0,0001

концентрации возрастает. Увеличение коэффициента задержания от давления при ультрафильтрационной очистке водных растворов крахмально-паточных производств от растворенных веществ можно объяснить образованием на ультрафильтрационных мембранах динамических мембран [5]. Их формирование происходит из мембранообразующего вещества, в данном случае из свекольного крахмала, адсорбирующегося на мембране, т. е. при прохождении раствора через ультрафильтрационную мембрану на ее поверхности и в порах адсорбируется крахмал. Удерживание мембранообразующих веществ на поверхности ультрафильтрационной мембраны зависит от энергии взаимодействия между веществом и мембраной. То есть чем больше энергия взаимодействия молекул вещества с поверхностью мембраны, тем больше времени вещество находится на поверхности мембраны [5–6].

Стационарное существование толщины селективного слоя динамической мембраны задается сдвиговым напряжением, определяемым значением тангенциального и нормального потоков. Поскольку тангенциальный поток поддерживается одинаковым, а его средняя линейная скорость намного превышает скорость трансмембранного потока, то снижение последнего происходит до тех пор, пока не достигается некоторая оптимальная для данных гидродинамических условий толщина, при которой скорость подвода мембранообразующих частиц к динамической мембране уравновешивается обратодиффузионным отводом.

При изменении гидродинамических условий подачи (повышение давления) исходного раствора над мембраной коэффициент задержания (рис. 2а) по растворенным веществам возрастает во всем диапазоне повышения давления и на всех типах формируемых динамических мембран. Это повышение коэффициента задержания вызвано особенностью динамических мембран, формируемых из крахмала, – их высокой сжимаемостью, т. е. с ростом давления над мембраной происходит сжимаемость селективного слоя динамической мембраны, вследствие чего возрастает вклад поверхностных сил (нерастворяющегося объема, электроповерхностных сил и т. д.). Эти вклады различны по величине для исследованных ультрафильтрационных мембран, на которых образуется селективный слой динамической мембраны.

Удельная производительность имеет более сложный вид зависимости от давления (рис. 2а). В первом периоде она с ростом давления повышается, а при более высоких давлениях (второй период) удельная производительность остается неизменной. Такой характер зависимости объясняется тем, что в области низких давлений (до 2 МПа) сжимаемость динамической мембраны не влияет на изменение удельной производительности (1 период). Повышение давления свыше 2 МПа уплотняет дисперсные частицы селективного слоя динамической мембраны таким образом, что пористость динамической мембраны (отношение объема водонаполненных областей к общему объему мембранной фазы) уменьшается, а ее сопротивление потоку жидкости увеличивается (2-й период). Для описания изменения удельной производительности от давления предложена следующая расчетная формула:

$$J = k \cdot (\Delta P^m - k_1 \cdot C) \cdot \exp(k_2 \cdot C^n) \cdot \exp\left(\frac{A_1}{T}\right), \quad (4)$$

где k – коэффициент водопроницаемости мембраны, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$; k_1, k_2, m, n, A_1 – числовые коэффициенты (табл. 1); ΔP – разность давлений, Па; T – температура раствора, К.

Для описания изменения коэффициента задержания от давления предложена следующая расчетная формула:

$$K = 1 - \frac{1}{(k_1 - 1) \cdot (1 - \exp(-k_2 \cdot G)) \cdot \exp(-k_3 \cdot G)}, \quad (5)$$

где k_1, k_2, k_3, G – числовые коэффициенты (табл. 2).

Расхождение экспериментальных и полученных с помощью формул (4)–(5) значений не превышает 15 %, что является достаточным для инженерных расчетов.

ВЫВОДЫ

При очистке растворов крахмально-паточных производств на ультрафильтрационной мембране образуются динамические мембраны из растворенных веществ, что позволяет: во-первых, осуществить процесс

самозадерживания таких веществ; во-вторых, достигать высокого коэффициента задержания и удельной производительности ультрафильтрационных мембран; в-третьих, за счет сжимаемости динамических мембран регулировать характеристики процесса разделения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аверьянова А.В., Севодин В.П.* Крахмал. Бийск: Изд-во Алтайского гос. техн. университета, 1999. 33 с.
2. *Лазарев С.И., Ковалев С.В.* Способ очистки и концентрирования водных растворов крахмально-паточных производств // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2010. Т. 15. Вып. 5. С. 1497-1500.
3. *Лазарев С.И., Коробов В.Б., Абоносимов О.А.* Влияние давления на эффективность ультрафильтрационной очистки водных растворов спиртовых производств // Известия вузов. Пищевая технология. 1998. № 1. С. 78-80.
4. *Лурье Ю.Ю.* Унифицированные методы анализа вод. М.: Химия, 1973. 376 с.
5. *Брык М.Т., Цатюк Е.А.* Ультрафильтрация. Киев: Наукова думка, 1989. 288 с.
6. *Дытнерский Ю.И.* Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986. 378 с.
7. *Ключников А.И., Пономарев А.Н., Полянский К.К.* Анализ концентрации поляризации в процессе микрофильтрации пива //

Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Тамбов, 2012. Т. 17. Вып. 2. С. 703-706.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Поступила в редакцию 7 сентября 2012 г.

Lazarev S.I., Golovashin V.L., Vorozheikin Y.A. ANALYSIS AND CALCULATION OF KINETIC COEFFICIENTS OF ULTRAFILTRATION SEPARATION OF SOLUTIONS OF STARCH AND TREACLE PRODUCTION

The studies to determine the kinetic characteristics of ultrafiltration membranes UAM-150 and UPM-K, depending on the operating pressure of an aqueous solution of starch and treacle production are conducted. The change of specific capacity and the coefficient of variation of detention at the operating pressure is revealed.

Key words: ultrafiltration; membrane; holding coefficient; specific performance.