

**Баромембранное разделение пищевых эмульсий  
с интенсификацией диффузионных процессов**

Алексеев Г.В., Яковлев А.А., Ильичев В.А.

[gva2003@rambler.ru](mailto:gva2003@rambler.ru)

Санкт-Петербургский государственный университет  
низкотемпературных и пищевых технологий

*Проблема выделения пищевых веществ из технологической воды пищевого предприятия имеет не только экономический смысл, но и существенным образом сказывается на экологической нагрузке на окружающую среду. Перспективные баромембранные технологии разделения таких сред не всегда могут быть использованы из-за малой производительности процесса и неудовлетворительной очистки воды. Известны попытки интенсификации диффузионных процессов, сопровождающих такие технологии, с помощью наложения на них различных физических полей. В работе предпринята попытка исследования целесообразности применения для указанных целей постоянного магнитного поля.*

**Ключевые слова:** разделение пищевых эмульсий, баромембранные процессы, постоянное магнитное поле, экспериментальные исследования.

**Baromembranous division food emulsion with intensive diffusion processes**

Alexeev G.V., Yakovlev A.A., Ilichev V.A.

[gva2003@rambler.ru](mailto:gva2003@rambler.ru)

Sankt-Petersburg state university of refrigeration and food technology

*The Problem of the separation food material from technological water of the food enterprise has not only economic sense, but also essential image tells on экологической to load on surrounding ambience. Perspective baromembrane technologies of division of such ambiences not always can be used because of small capacity of the process and unsatisfactory peelings of water. The Known attempts интенсификации диффузионных processes, accompanying such technologies, by means of impositions*

*on them different physical by flap. In work is undertaken attempt of the study to practicability of the using for specified integer of the constant magnetic field.*

The Keywords: division food emulsion, baromembrane processes, constant magnetic field, experimental studies.

Проведение разделительных операций при реализации баромембранного процесса технологическим аппаратом, использующим воздействие физических полей, связано с изучением свойств поверхности раздела мембраны и сырья, скоростей перемещения сырья, характера предварительной подготовки сырья и других технологических факторов.

Таким образом, при предварительной обработке, например, в постоянном магнитном поле представляет интерес исследование влияния на характеристики процесса фильтрования таких режимов, как время омагничивания и значения магнитной индукции [1].

Этот вопрос исследовали, изучая характеристики процесса фильтрования по следующей методике.

Движущая сила процесса фильтрования – разность давлений по абсолютной стороне фильтровальной перегородки.

$$\Delta p = p_1 - p_2 \text{ при } p_1 > p_2. \quad (1)$$

Условия протекания процесса фильтрования зависят от способа создания разности давлений.

Выбираем фильтрование при постоянной разности давлений  $\Delta p = \text{const}$ ;

При фильтровании под давлением движущая сила процесса

$$\Delta p = p_{\text{изб}} - p_{\text{атм}}; p_1 = p_{\text{изб}}; p_2 = p_{\text{атм}}. \quad (2)$$

Величина избыточного давления ограничена мощностью насоса и прочностью аппарата.

$$\lim_{p_{\text{изб}} \rightarrow \infty} (\Delta p) = p_{\text{изб}} - p_{\text{атм}}.$$

при  $p_{\text{атм}} = 10^5$ ;  $\lim \Delta p = \infty$ .

Непрерывное удаление осадка при фильтровании под давлением значительно усложняет конструкцию фильтра. Фильтрование при постоянной скорости осуществляется, если суспензию подают на фильтр поршневым насосом с постоянной производительностью (при данном числе оборотов электродвигателя).

Если суспензию подают на фильтр центробежным насосом с уменьшающейся (при данном числе оборотов электродвигателя) производительностью при возрастании сопротивления осадка, то процесс фильтрования осуществляется при переменных разности давлений и скорости.

Эффективность процесса разделения характеризуется "эффектом разделения" или степенью очистки  $\eta$  (в %)

$$\eta = \frac{C_1 - C_2}{C} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – концентрации различных фаз соответственно в исходной среде и фильтрате.

Интенсивность процесса фильтрования оценивают скоростью или удельной производительностью  $W$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ .  $W$  – это объем фильтрата (в  $\text{м}^3$ ), полученный с  $1 \text{ м}^2$  фильтрующей поверхности за 1с.

$$W = \frac{dQ}{F \cdot d\tau} = \frac{dV}{d\tau}. \quad (4)$$

Среднюю скорость процесса определяют по формуле

$$W_{\text{ср}} = \frac{Q}{F \cdot \tau} = \frac{V}{\tau}, \quad (5)$$

где  $V = \frac{Q}{F}$  – удельный объем фильтрата, ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ ).

Скорость фильтрования может быть определена по закону Дарси

$$W = k\Delta p, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент сопротивления,  $\text{м}/\text{Па} \cdot \text{с}$ .

Коэффициент сопротивления (фильтрования) имеет вид [2]

$$k = \frac{1}{\mu(R_{\text{ос}} + R_{\text{ф}})}. \quad (7)$$

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости одной из фаз исходной среды,  $\text{мс}/\text{м}^2$ .

В каждый момент времени скорость фильтрования прямо пропорциональна разности давлений  $\Delta p$  и обратно пропорциональна сопротивлению  $R$  и вязкости жидкости  $\mu$

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(R_{\text{ос}} + R_{\text{ф}})}. \quad (8)$$

Сопротивление мембраны определяют равенством

$$R_{\text{ос}} = r_{\text{ос}}h, \quad (9)$$

где  $r_{\text{ос}}$  – удельное сопротивление мембраны,  $\text{м}^{-2}$ ;  $h$  – толщина мембраны,  $\text{м}$ .

$$h = \frac{\chi Q}{F} = \chi V, \quad (10)$$

где  $\chi$  – объемная концентрация одной из фаз в разделяемой среде.

Из уравнения (8) с учетом (9) и (10) можно получить основное уравнение фильтрования

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p}{\mu(r_{\text{ос}}hV + R_{\text{ф}})}. \quad (11)$$

Решим уравнение (11) для фильтрования при постоянном перепаде давления. В этом случае:  $\Delta p = \text{const}$  – движущая сила постоянна;  $r_{\text{ос}} = \text{const}$  – толщина мембраны постоянна;  $h = \text{var}$  – высота слоя осадка увеличивается;  $\chi = \text{const}$  – концентрация одной из фаз в среде постоянна;  $R_{\text{ф}} = \text{const}$  – сопротивление фильтрующей перегородки не изменяется в процессе фильтрования.

После интегрирования (11) в пределах от 0 до  $V$  и от 0 до  $\tau$ , получим

$$V^2 + 2 \frac{R_{\text{ф}}}{r_{\text{ос}} \chi} V = 2 \frac{\Delta p}{\mu r_{\text{ос}} \chi} \tau \quad (12)$$

или

$$V^2 + 2cV = k\tau, \quad (13)$$

где  $c, k$  – константы фильтрования ( $c = \frac{R_{\text{ф}}}{r_{\text{ос}} \chi}$ ,  $k = \frac{2\Delta p}{\mu r_{\text{ос}} \chi}$ ).

Используя соотношения (13), записанные для двух экспериментальных точек можно посчитать константы фильтрования, которые могут выступать в качестве целевых функций характеризующих эффективность фильтрации пищевой эмульсии, предварительно обработанной в постоянном магнитном поле.

Поскольку на основании литературных данных [3] можно предположить зависимость констант фильтрования от характеристик магнитной обработки, в ходе планирования эксперимента в качестве варьируемых выбирались:

- время обработки пищевой эмульсии в магнитном поле,  $\tau$  [с];
- индукция магнитного поля,  $B$  [мТл].

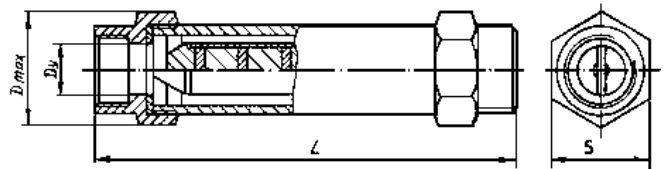


Рис. 1. Установка для ультрафильтрации

В соответствии с принятыми интервалами варьирования кодированные переменные записывались в виде

$$X_1 = (\tau - 180)/85 \quad \text{и} \quad X_2 = (B - 125)/46.$$

Для детального исследования влияния указанных параметров на константы фильтрования для разработки рекомендаций по реализации процесса фильтрации целесообразно провести факторный эксперимент, выбрав указанные выше интервалы в качестве интервалов варьирования изменяемых факторов.



а)

б)

Рис. 2. Устройство для магнитной обработки пищевой эмульсии

а) общий вид;

б) схема устройства.

Такой эксперимент проводили с помощью устройства для магнитной обработки с базовой конструкцией изображенной на рисунке 2. Для обеспечения варьирования параметров обработки на наружной поверхности корпуса, изготовленного из нержавеющей стали, размещали дополнительные

соленоиды по числу размещенных внутри постоянных магнитов. Подсоединение этих соленоидов к источнику постоянного тока через реостат позволяло регулировать в них величину тока, а следовательно и величину магнитной индукции в зазоре устройства с проходящей пищевой эмульсией.

На первом этапе проведения эксперимента искали зависимость эксплуатационных параметров рабочих органов, принятых в качестве функций отклика, от варьируемых параметров в виде

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2$$

Достаточно высокая точность поддержания выбранных факторов на заданных уровнях, выявленная в ходе предварительных исследований, позволила для дублирования ограничиться тремя параллельными опытами.

Рандомизировав последовательность опытов при помощи таблицы случайных чисел для устранения влияния случайных погрешностей, матрицы планирования эксперимента записывали в виде специальных таблиц.

После испытания образцов в порядке, результаты заносились в столбцы, отведенные для функций отклика:

$Y_1$  – константа фильтрации  $C$ ;

$Y_2$  – константа фильтрации  $k$ .

Для получения статистически достоверной математической модели при анализе экспериментальных данных проверялась однородность дисперсий выборок функций отклика  $Y_1$  и  $Y_2$ . Для этой цели вычислялось значение критерия Фишера.

Найденное соотношение между расчетным и табличным значениями критерия Фишера свидетельствует о воспроизводимости эксперимента, что дает возможность вычислить коэффициенты модели.

Вычисления по известным формулам для выполненного эксперимента дали следующие оценки коэффициентов уравнения регрессии для  $Y_1$  :

$$a_0 = 0,3943; a_1 = -0,0162; a_2 = 0,0124;$$

В соответствии с проведенными вычислениями оценка уравнения регрессии записывается в виде:

$$Y_1 = 0,3943 - 0,0162X_1 + 0,0124X_2$$

Аналогичным образом получены оценки коэффициентов другого уравнения регрессии

$$Y_2 = 3,336 + 0,028 X_1 - 0,006 X_2$$

Уравнения регрессии, построенные по этим формулам только в том случае соответствуют реальному процессу, когда каждый член их вносит вклад, значимо отличающийся от случайных колебаний функций отклика. Это условие выполняется, если абсолютная величина коэффициента больше его доверительного интервала, определяемого при помощи критерия Стьюдента с определенной степенью свободы.

Вычисления интервалов достоверности коэффициентов регрессии свидетельствуют о том, что в уравнениях регрессии значимы лишь те члены, для которых выполняется условие

$$\text{для } Y_1 \quad - \quad |a_i| \geq 0,011$$

$$\text{для } Y_2 \quad - \quad |a_i| \geq 0,005.$$

Последним шагом, предшествующим использованию полученных экспериментально соотношений, является проверка его адекватности. Эта проверка позволяет судить о том, не отброшены ли в процессе обработки результатов величины, существенные для достоверного воспроизведения полученной зависимостью реального процесса и правильно ли выбрана искомая математическая модель. Она заключается в вычислении расчетного значения критерия Фишера и его сравнении с табличным.

Пользуясь данными таблиц и результатами произведенных вычислений для расчетного критерия Фишера, находим  $F_p = 14,22$ . Для доверительной вероятности 95% и соответствующих степеней свободы числителя и знаменателя табличное значение критерия Фишера оказалось равным 12,67.

Соотношение  $F_p > F$  свидетельствует о том, что выбранная на первом этапе линейная математическая модель оказалась неадекватной реальной зависимости коэффициентов фильтрации от варьируемых в эксперименте факторов. Для отыскания зависимости адекватной реальной достраивали план полного эксперимента до центрального композиционного ротатабельного плана.

Зависимости  $Y_1$  и  $Y_2$  от варьируемых параметров в этом случае искали в виде

$$f = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2$$

Учитывая вычисления, проведенные с помощью пакета прикладных программ EXCEL, включавшие оценку значимости полученных коэффициентов, уравнения регрессии записывали в виде:

$$Y_1 = 0,384 - 0,0169X_1 + 0,0089X_2 - 0,0031X_1^2 + 0,0035X_2^2 + 0,0009 X_1 X_2$$

$$Y_2 = 3,392 + 0,028X_1 - 0,006X_2 - 0,028X_1^2 - 0,028X_2^2 - 0,028X_1 X_2$$

Полученные уравнения лишь в том случае имеют практическую ценность, когда адекватно описывают исследуемую зависимость. С целью проверки адекватности полученных уравнений регрессии вычисляли дисперсию адекватности.

Для данных новой экспериментальной таблицы, уровня значимости 0,05 и соответствующих степеней свободы числителя и знаменателя, расчетное значение критерия Фишера оказалось значительно меньше табличного.

Полученные, таким образом, уравнения регрессии отображают реальные зависимости искомых коэффициентов фильтрации от параметров обработки пищевой эмульсии в магнитном поле.

Анализ полученных уравнений регрессии проводили графически, для чего построили соответствующие графики поверхностей изучаемых функций отклика. Такие графические зависимости приведены на рисунке 3.

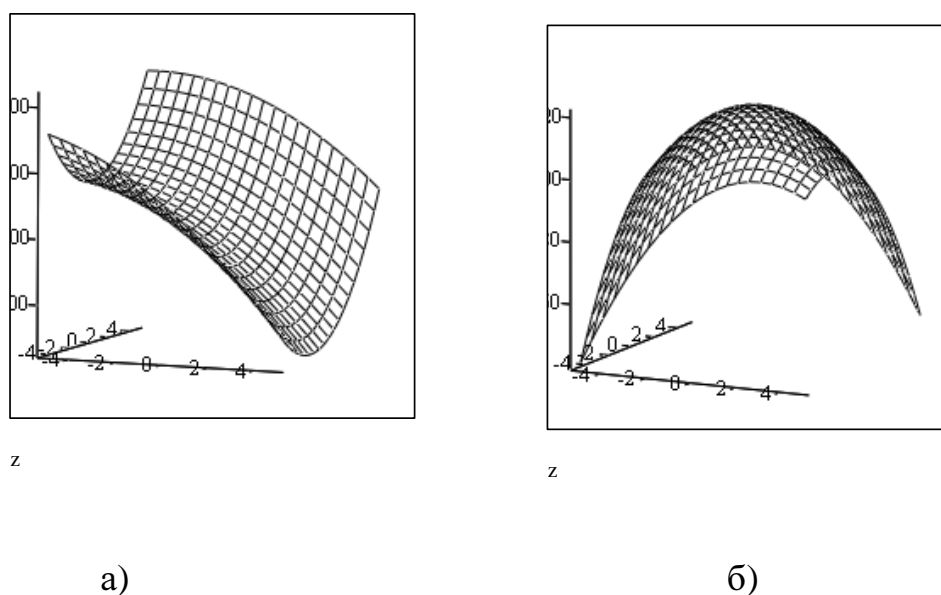


Рис. 3. Графическое изображение поверхностей отклика

а) –  $Y_1$  ; б) -  $Y_2$



На построенных графиках по оси ОХ отложены время обработки в магнитном поле  $\tau$ , а по оси ОУ – индукция магнитного поля В.

Из графика 3а) следует, что наиболее высокое значение С, реализуется скорее всего при достаточно большом времени обработки и малых индукциях магнитного поля. При этом при небольшом времени  $X < 4$  аналогичное значение коэффициента С может быть достигнуто и при значительных индукциях магнитного поля.

Рисунок 3б) свидетельствует о том, что с точки зрения коэффициента фильтрации k процесс имеет явно выраженный экстремум.

Точное определение области экстремума, то есть значений изменяемых параметров, при которых достигается экстремальное значение фильтрационных характеристик, определяется дифференцированием полученного уравнения и проверкой критерия Сильвестра. С этой целью вычисляют величину критерия и определяют его знак.

$$Y = \partial^2 Y / \partial^2 X_1 \times \partial^2 Y / \partial^2 X_2 - (\partial^2 Y / \partial X_1 \partial X_2)^2$$

Для функции отклика  $Y_1$  величина такого критерия отрицательна и поэтому экстремум отсутствует. В случае функции отклика  $Y_2$  критерий Сильвестра положителен, а вторая производная по  $X_1$  отрицательна. Это говорит о наличии максимума функции  $Y_2$  для определенных значений аргументов. Для их вычисления необходимо приравнять нулю первые производные и решить соответствующую систему уравнений.

$$\partial Y_2 / \partial X_1 = 0; \quad \partial Y_2 / \partial X_2 = 0.$$

Найденными решениями записанной системы уравнений являются  $X_1 = 0,71$  и  $X_2 = -0,41$ .

С практической точки зрения для заранее заданных значений  $Y_1$  и  $Y_2$  могут быть подобраны величины коэффициентов фильтрации, удовлетворяющие заказчика по технологическим или экономическим соображениям.

Таким образом, полученные экспериментально уравнения регрессии могут служить математическими моделями новых процессов фильтрации, которые целесообразно использовать после разработки специальных конструкций для предварительной подготовки пищевых эмульсий.

## Список литературы

1. Яковлев А.А., Корзенков К.В., Алексеев Г.В. Перспективы водоподготовки для пищевых сред изменением реологических свойств. Материалы IV научно-практическая конференция «Актуальные проблемы общей, региональной и прикладной экологии», Кемерово, 2009, с.24-27
2. Лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты пищевых производств». Под ред. А.С.Гинзбурга, М., Пищевая промышленность, 1976. 272 с.
3. Борисенко А.А., Брацихин А.А., Зорин А.В. Исследование физико-химических показателей рассола с белково-углеводным продуктом “ЛАКТОБЕЛ” под действием магнитного поля. Материалы XXXIV научно-технической конференции. Ставрополь, 2005. <http://www.ncstu.ru>