

УДК 664.6.001.8

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.208984

## Разработка способа устранения гель-шара в процессе мембранной обработки пектинового экстракта

Г. В. Дейниченко, В. В. Гузенко, Д. В. Дмитревский, В. Н. Червоный,  
А. В. Омельченко, Д. В. Горелков, О. Е. Мельник, О. Б. Короленко

*Розглянуто питання щодо нового способу усунення гель-шару на поверхні мембран за ультрафільтраційного концентрування пектинового екстракту. Розроблено експериментальну установку і методику обробки результатів дослідження процесу концентрування пектинових екстрактів із застосуванням способу видалення гель-шару на поверхні мембрани. Представлені результати досліджень застосування способу вібраційного перемішування для усунення гель-шару і його впливу на продуктивність мембран. Отримано математичні моделі та визначено режими проведення процесу ультрафільтрації пектинового екстракту із застосуванням вібраційного перемішування.*

*Приведені графічні залежності кількісних та якісних характеристик пектинових концентратів (концентрація пектинових речовин та сухих речовин в концентраті) в залежності від вхідних параметрів температури та тиску процесу ультрафільтраційного концентрування. Аналіз приведених характеристик дозволив встановити раціональні вхідні параметри процесу концентрування пектинових екстрактів. Раціональними робочими параметрами процесу концентрування пектинових екстрактів із застосуванням нового способу видалення гель-шару є тиск фільтрації 0,4–0,5 МПа, температура 35...45 °С, тривалість –1,5–2,0 години та швидкість вібраційного перемішування 1,5–1,7 м/с.*

*Дане дослідження проведене з метою інтенсифікації мембранного концентрування пектинових екстрактів, підвищення технічного рівня процесу концентрування та реалізації розробленого способу в промислових умовах. За результатами досліджень було встановлено доцільність застосування нового способу видалення гель-шару. Подальше впровадження цих результатів у харчову та переробну промисловість дасть змогу застосувати їх у виробництві пектинопродуктів широкого асортименту*

*Ключові слова: пектиновий екстракт, мембранна обробка, поляризаційний шар, ультрафільтраційне концентрування, вібраційне перемішування*

### 1. Введение

Ухудшение экологической ситуации во многих странах, а также связанное с этим загрязнение окружающей среды и продуктов питания токсическими веществами, обуславливает необходимость увеличения объемов производства пектина и пектинопродуктов, как природных детоксикантов. Пектин признан всемирной организацией здравоохранения как ценный пищевой продукт, который способен образовывать комплексы и выводить из организма человека тяжелые металлы и долгоживущие изотопы цезия, стронция, иттрия и т. д. [1].

Наряду с этим, высокая эффективность использования мембранных процессов в различных промышленных технологиях, а также их экологичность, способствовали стремительному росту мембранной технологии, а также связанного с этим повышения финансирования во всех развитых странах [2]. Мембранные методы разделения жидких смесей находят все большее применение в мире [4].

На сегодня, создание новых прогрессивных продуктов питания, направленных на оздоровление населения, увеличивает спрос на пектин, как пищевой добавки. Поэтому, актуальным является создание и исследование новых технологических и технических решений, чтобы использование пектина, во-первых, позволило расширить ассортимент производства пектинсодержащей продукции, а во-вторых, уменьшило затраты на его приобретения [5].

## **2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

В работе [6] исследованы технологические параметры ультрафильтрационного (УФ) концентрирования свекловичных пектиновых экстрактов и качественные показатели полученных пектиновых концентратов, полученных при участии процесса перемешивания. Но в полной мере остались не решенными вопросы интенсификации процесса за счет подбора технологических параметров температуры и давления процесса. Это обусловлено широкой разновидностью мембран, в частности полимерных, которые могут быть используемые в разных условиях проведения ультрафильтрации с различной степенью стойкости к технологической среде [7].

Наряду с тем, что процесс УФ-обработки широко используются в отраслях перерабатывающей промышленности во время производства растительных концентратов, в настоящее время техническое обеспечение процесса УФ для переработки пектинсодержащего сырья имеет ряд особенностей [8].

В то же время трудность в развитии ультрафильтрационных методов обработки пектиновых экстрактов составляет низкие показатели производительности УФ-мембран, что обусловлено физико-химическими свойствами пектиновых веществ [9]. При этом практически отсутствует разработка мембранного оборудования небольшой производительности, что связано с недостаточным количеством технических решений для интенсификации процесса УФ-концентрирования [10].

Недостатком процесса мембранных методов концентрирования пектиновых экстрактов является образование гель-слоя на селективной поверхности полимерной мембраны. Это делает процессы обработки пектиновых экстрактов длительными и экономически малоэффективными [11, 12]. Для устранения образования гель-слоя в конструкции создаваемого мембранного модуля предусматривают устройства для турбулизации потока разделяемых пектиновых экстрактов, в частности, гидромеханические процессы [13].

На эффективность процесса УФ-концентрирования пектиновых веществ в значительной мере влияет концентрация сухих веществ в растворе, который обрабатывается [14]. С повышением массовой доли сухих веществ в пектиновом экстракте скорость УФ-концентрирования уменьшается. Кроме того, в условиях продолжительного концентрирования пектиновых экстрактов с высоким со-

держанием сухих веществ условия появления гель-слоя, который влияет на эффективность процесса, значительно улучшаются [15].

Хотя литературные источники имеют значительное количество методов и устройств гидромеханического влияния по устранению образования гель-слоя на поверхности мембран, но их потенциальные возможности далеко не исчерпаны [16]. Поэтому перспективу составляет предусмотрение и исследование новых мер борьбы с поляризационным гель-слоем на поверхности полимерной мембраны. В частности, перспективным является использование метода вибрационного перемешивания потока разделяемой среды, что создаст эффективную турбулизацию процесса УФ-концентрирования пектиновых экстрактов [17]. Все выше обозначенное подтверждает целесообразность экспериментального исследования и анализа в этом направлении для повышения количественных и качественных показателей пектинового концентрата и обеспечения потребителя высококачественными пектинопродуктами, в частности пектиновыми концентратами.

### **3. Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка процесса УФ-концентрирования пектиновых экстрактов с применением способа вибрационного перемешивания для предотвращения образования гель-слоя на поверхности полупроницаемой мембраны.

Чтобы достигнуть указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику исследования процесса УФ-концентрирования пектиновых экстрактов с применением нового способа устранения гель-слоя;
- определить факторы, влияющие на процесс УФ-концентрирования пектиновых экстрактов с использованием способа вибрационного перемешивания;
- определить рациональные параметры ультрафильтрационного концентрирования пектинового экстракта для разработанного способа устранения гель-слоя.

### **4. Материалы и методы исследования УФ-концентрирования пектинового экстракта с применением вибрационного перемешивания**

#### **4.1. Схема экспериментальной установки с вибрационным турбулизатором и ее принцип работы**

В научной лаборатории «Нанотехнологии пищевых продуктов» Харьковского государственного университета питания и торговли (Украина) были проведены исследования по выбору рациональных параметров проведения УФ-концентрирования пектиновых экстрактов [18]. Для усовершенствования процесса ультрафильтрационно й обработки пектинового экстракта был предложен способ устранения гель-слоя, в котором участвуют как физические, так гидромеханические процессы.

С целью ускорения процесса УФ-концентрирования пектинового экстракта был предложен способ устранения гель-слоя путём вибрационного перемешивания обрабатываемых пищевых жидкостей в непосредственной близости от поверхности полупроницаемых УФ-мембран. Ускорение процесса ультрафильтрации при этом происходит за счёт совокупного влияния на гель турбулизации

потоков обрабатываемой жидкости и гидравлического удара жидкости о поверхность УФ-мембраны [19, 20].

На рис. 1 представлена принципиальная схема ультрафильтрационной экспериментальной установки на основе мембранного модуля с вибрационным турбулизатором.

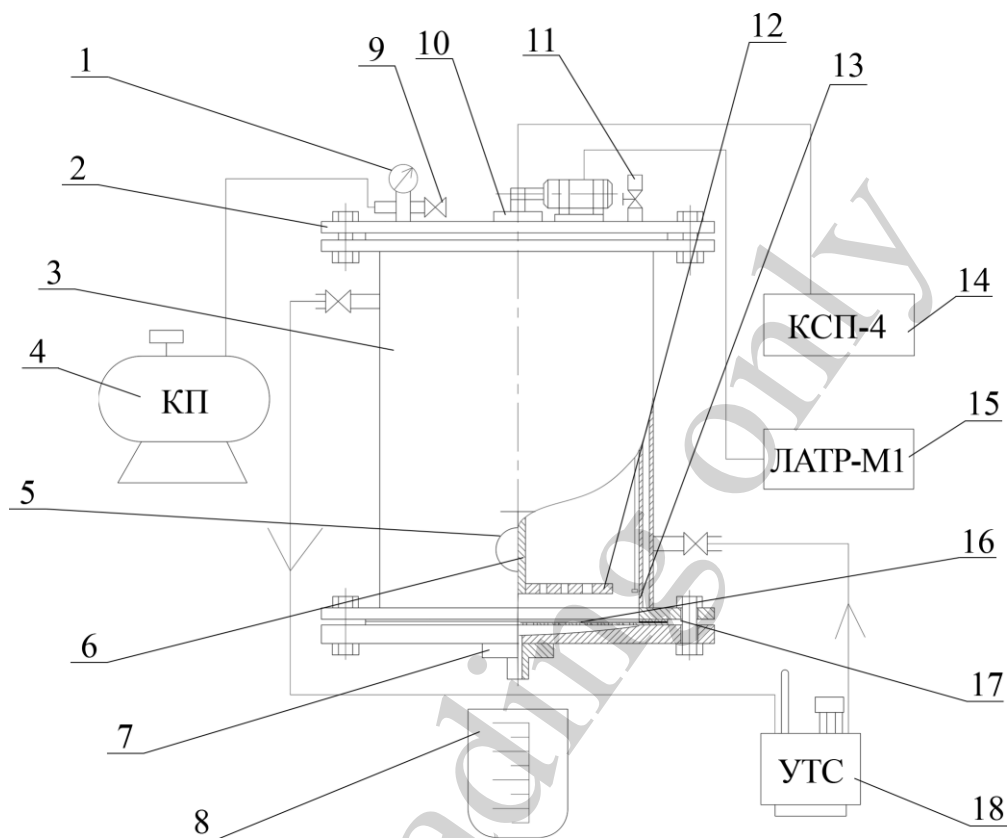


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной ультрафильтрационной установки с вибрирующей платиной: 1 – манометр; 2 – верхняя крышка; 3 – корпус мембранного аппарата; 4 – компрессор; 5 – кран для отвода ультрафильтрационного концентрата; 6 – вибрационный турбулизатор; 7 – нижняя крышка; 8 – емкость для сбора пермеата; 9 – кран для подвода и сброса давления; 10 – уплотнитель; 11 – электропривод; 12 – кран для подвода чистого растворителя; 13 – резиновая прокладка; 14 – термопара; 15 – потенциометр КСП-4; 16 – ультрафильтрационная мембрана; 17 – подкладка; 18 – ультратермостат (УТ)

Основу ультрафильтрационной лабораторной установки составляет фильтрующий модуль 1, выполненный из нержавеющей стали, внутренний объем которого равен 5 л. К нижней и верхней основам модуля приварены фланцы, к которым при помощи стяжных болтов крепятся верхняя 2 и нижняя 7 крышки. Герметичность крепления крышек обеспечивают резиновые прокладки 13. На нижней крышке, которая имеет сквозные радиально просверленные отверстия для выхода пермеата, крепится полупроницаемая ультрафильтрационная мембрана 16. В верхнюю крышку вмонтированы манометр 2 для контроля над давлением процесса, что обеспечивает поддержку необходимого давления фильтрации при полной герметичности, и термопара 18, соединенная с потенциометром 15 КСП-4. На

верхней крышке также расположен кран для подвода и сброса давления 9, через который при помощи компрессора 4 образуется в середине модуля необходимое давление. Верхнюю крышку также оснащен краном (12) для подвода чистого растворителя в процессе диафильтрационной очистки концентрата. Для исследования турбулизации процесса внутри модуля размещен вибрационный турбулизатор (6), работа которого поддерживается электроприводом (11). Мембранный аппарат имеет тепловую рубашку, температура воды в которой регулируется с помощью ультратермостата (18). В нижней части фильтровального модуля находится кран (5) для отвода ультрафильтрационного концентрата жидкости, а пермеат через штуцер в нижней крышке собирается в емкость (8). Рабочая поверхность мембран установки составляет 0,024 м<sup>2</sup>.

Внешний вид экспериментальной ультрафильтрационной установки в процессе концентрирования пектинового экстракта в лабораторных условиях показан на рис. 2.



Рис. 2. Экспериментальная установка в работе

Процесс УФ на данной установке происходит следующим образом. В мембранный аппарат заливают необходимое количество жидкости, которая обрабатывается (пектиновый экстракт). С помощью компрессора (4) создают необходимое давление и проводят УФ-концентрирование. Для исследования влияния турбулизации на процесс УФ-концентрирования включают электропривод (11), который приводит в движение вибрационный турбулизатор (6). Во время уф-концентрирования через мембрану проходит пермеат, который собирается с помощью воронкообразной поверхности в нижней крышке (7) в измерительную емкость (8). Уф-концентрат пэ в случае достижения требуемого значения фактора концентрирования отбирается из фильтровальной аппарат с помощью крана (5).

При проведении экспериментов необходимое давление в надмембранном пространстве УФ-модуля создавали с помощью компрессора и меняли от 0,2 до 0,6 МПа. Скорость движения потока ПЭ в межмембранном канале при исполь-

зовании вибрационного перемешивания составила 0,5...2,0 м/с. Через 20 мин, когда скорость ультрафильтрации становилась постоянной, измеряли количество фильтрата, прошедшего через мембрану за 10 мин. Определение количества ПВ в концентрате осуществляли согласно объемному методу. Количество сухих веществ определяли методом рефрактометрии [15].

Для построения зависимости производительности УФ-мембран от скорости вибрационного перемешивания все эксперименты проводились в пятикратной повторности. Результаты исследований подвергались статистической обработке методом наименьших квадратов для определения погрешности полученных данных. Обработку экспериментальных данных проводили методами статистического моделирования с использованием табличного процессора Microsoft Excel 2007. Отличия считались статистически значимыми при достоверности  $A=0,95$ .

#### 4. 2. Моделирование процесса УФ-концентрирования пектинового экстракта

В режиме вибрационного перемешивания включали электродвигатель, соединенный с мешалкой, расположенной внутри УФ-модуля. Необходимые гидродинамические условия на поверхности полупроницаемой мембраны создавали с помощью лабораторного автотрансформатора ЛАТР.

С целью определения качественных характеристик процесса УФ-концентрирования пектинового экстракта была предложена математическое моделирование по методу планирования факторного эксперимента [21]. При этом по плану факторного эксперимента было проведено 10 опытов, результаты которых приведены в 5 разделе.

В результате математического моделирования были получены уравнения регрессии (1)–(3), позволяющие более детально изучить факторы, влияющие на процесс УФ-концентрирования пектинового экстракта. В то же время, приведенные ниже уравнения позволили определить рациональные параметры получения УФ-концентратов пектинового экстракта по значениям производительности УФ-мембран типа ПАН.

Математическое моделирование и построение поверхности отклика качественных параметров процесса УФ проводили при помощи проблемно-ориентированного пакета математических расчетов Mathcad 15 на ПК.

При этом для исследования процесса УФ-концентрирования пектинового экстракта были выбраны следующие основные входные параметры процесса:  $t$  – температура УФ-концентрирования, °С;  $P$  – давление фильтрации, МПа,  $\tau$  – продолжительность обработки, с<sup>-2</sup>.

Уравнение для концентрации ПВ в пектиновом концентрате при УФ-концентрировании с использованием способа вибрационного перемешивания:

$$C_{\text{ПВ}}=3,718+0,028 \cdot t-10,804 \cdot P-1,251 \cdot \tau-6,362 \cdot 10^{-4} \cdot t^2+9,063 \cdot P^2+0,145 \cdot \tau^2+0,085 \cdot t \cdot P+7,143 \cdot 10^{-3} \cdot t \cdot \tau+1,429 \cdot P \cdot \tau; \quad (1)$$

Уравнение для содержания СВ в пектиновом концентрате при УФ-концентрировании с использованием способа вибрационного перемешивания:

$$C_{с.в.к.}=12,37-0,065 \cdot t-13,589 \cdot P+4,592 \cdot \tau-6,004 \cdot 10^{-4} \cdot t^2-4,152 \cdot P^2-0,908 \cdot \tau^2+0,492 \cdot t \cdot P+0,01 \cdot t \cdot \tau+1,786 \cdot P \cdot \tau; \quad (2)$$

Уравнение для содержание СВ в пектиновом пермеате при УФ-концентрировании с использованием способа вибрационного перемешивания:

$$C_{с.в.п.}=-1,082+0,092 \cdot t+6,982 \cdot P+2,267 \cdot \tau-1,484 \cdot 10^{-3} \cdot t^2-23,973 \cdot P^2-0,634 \cdot \tau^2+0,303 \cdot t \cdot P+0,016 \cdot t \cdot \tau+1,571 \cdot P \cdot \tau. \quad (3)$$

### 5. Результаты исследований влияния способа вибрационного перемешивания на процесс УФ-концентрирования пектинового экстракта

Одной из главных характеристик УФ-мембран является производительность. Различают начальную производительность мембран, то есть производительность новых мембран в начальный период их эксплуатации [22] и действительную производительность, характеризующая работу мембран в условиях постоянной эксплуатации [10].

Результаты проведенных опытов относительно влияния параметров процесса на производительность полупроницаемых мембран ПАН-50 и ПАН-100 приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Результаты опытов по УФ-концентрированию пектинового экстракта УФ-мембраной ПАН-100

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$\tau, \text{с} \cdot 10^{-2}$	$C_{ПВ}, \%$	$C_{с.в.к.}, \%$	$C_{с.в.п.}, \%$
60	0,2	4	2,5	6,5	2,8
60	0,6	0,5	3,0	6,6	3,0
60	0,2	0,5	2,1	4,2	1,8
60	0,6	4	5,4	9,8	4,7
20	0,6	2	1,9	6,1	1,7
20	0,4	4	2,0	6,5	1,9
20	0,4	0,5	1,6	4,5	1,6
20	0,2	2	1,5	6,6	2,1
40	0,2	4	2,3	6,8	2,3
40	0,4	2	2,1	7,4	3,4

Анализ полученных данных показывает, что увеличение давления при УФ-концентрировании ПЭ более 0,4–0,5 МПа нецелесообразно, поскольку это не приводит к значительному увеличению производительности обоих типов мембран. Кроме того, использование вибрирующего перфорированного диска позволяет не только значительно повысить производительность УФ-мембран за счет предотвращения образования гель-слоя на их поверхности, но и снизить рабочее давление в напорном канале УФ-модуля.

Повышение температуры ПЭ при их УФ-концентрировании более 45...55 °С нецелесообразно, поскольку значительного роста производительности полупро-

нищаемых мембран при этом не происходит. Кроме того, следует учесть, что слишком высокие температуры приводят к нежелательным биохимическим преобразованиям пектиновых веществ и снижению их функциональных свойств.

Таблица 2

Результаты опытов по УФ-концентрированию пектинового экстракта УФ-мембраной ПАН-50

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{МПа}$	$\tau, \text{с} \cdot 10^{-2}$	$C_{\text{ПВ}}, \%$	$C_{\text{с.в.к.}}, \%$	$C_{\text{с.в.п.}}, \%$
60	0,2	4	4,0	4,7	2,2
60	0,6	0,5	1,3	4,6	2,3
60	0,2	0,5	1,0	3,6	1,2
60	0,6	4	4,9	2,7	3,2
20	0,6	2	2,8	2,8	0,1
20	0,4	4	3,3	3,2	0,3
20	0,4	0,5	1,2	2,0	0,6
20	0,2	2	1,1	2,5	0,8
40	0,2	4	3,5	4,6	2,4
40	0,4	2	1,9	4,7	2,1

На рис. 3 приведена графическая зависимость влияния скорости пульсирующих потоков вибрационного перемешивания ПЭ во время их УФ-обработки на производительность УФ-мембран типа ПАН. Графические зависимости показывают, что изменение производительности как для мембраны ПАН-50, так и для ПАН-100 имеет одинаковый характер. С увеличением скорости пульсирующих потоков до значений  $U=1,5-1,7$  м/с наблюдается повышение производительности мембран в 1,5–1,6 раза.

Значение качественных характеристик ПК (концентрация ПВ в ПК и содержание сухих веществ (СВ) в концентрате и пермеате), полученных в режиме с вибрационным перемешиванием, зависят от многих технологических параметров. Но значительная разница характеристик наблюдается при различных значениях температуры и давления процесса фильтрации (рис. 4, 5).

Значение содержания СВ в ПК изменяются с увеличением параметров температуры и давления процесса УФ-концентрирования. Так, максимальные значения содержания СВ в концентрате и пермеате составляют:  $C_{\text{с.в.к.}}=9,8 \%$  и  $C_{\text{с.в.п.}}=5,3 \%$ , при значениях температуры 50...60 °С и давлении процесса 0,5–0,6 МПа; минимальные значения:  $C_{\text{с.в.к.}}=5,8 \%$  и  $C_{\text{с.в.п.}}=2,1 \%$ , при значениях температуры 20...25 °С и давлении 0,2–0,3 МПа.

Из приведенных данных видно, что изменение значений концентрации ПВ в пектиновых концентратах полученных УФ-концентрированием, и содержание СВ в концентрате и пермеате для мембраны ПАН-100 подтверждает сложный характер нелинейных зависимостей. Так, зависимость концентрации ПВ в ПК имеет значения максимумов в точках применения максимальных параметров и нисходящий характер с уменьшением параметров процесса УФ-концентрирования. Так, максимальные значения концентрации ПВ в концентрате  $C_{\text{ПВ}}=5,4 \%$  наблюдаются



при температуре 60 °С и давления процесса 0,5–0,6 МПа, минимальные значение  $C_{ПВ}=1,6\%$  – при температуре 20 °С и давлении 0,2 МПа. При определенных рациональных значениях температуры и давления ультрафильтрации концентрация пектиновых веществ в ПК составляет:  $C_{ПВ}=3,5–4,0\%$ .

$G, \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$

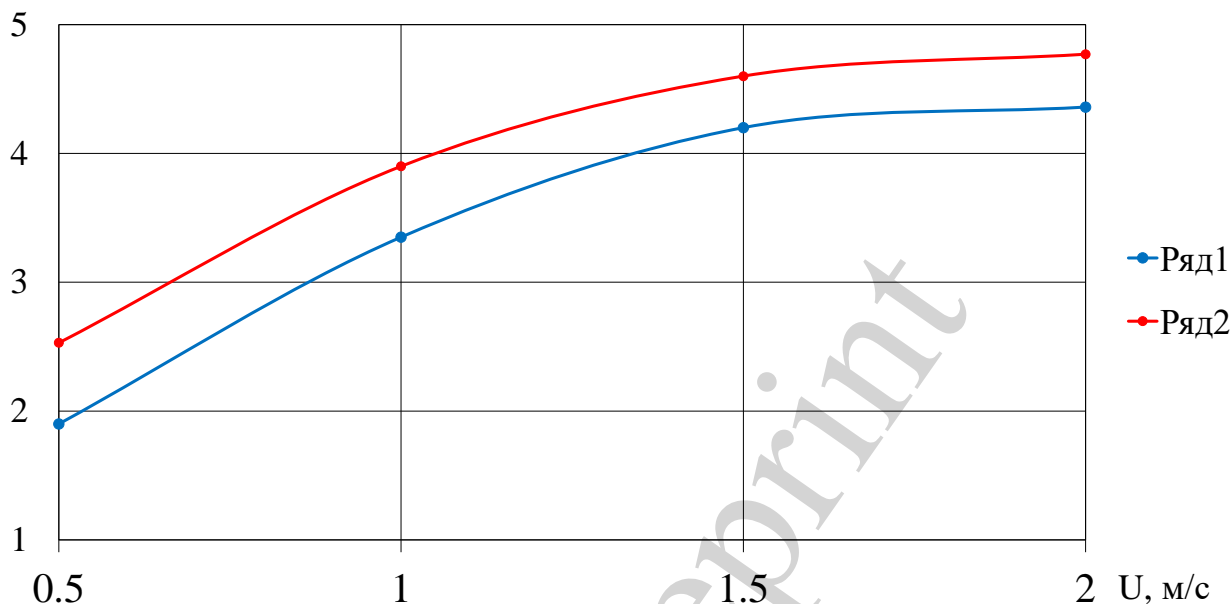


Рис. 3. Зависимость производительности УФ-мембран типа ПАН от скорости вибрационного перемешивания процесса мембранного разделения пектиновых экстрактов при температуре 50 °С и давлении 0,4 МПа: 1 – мембрана ПАН-50; 2 – мембрана ПАН-100

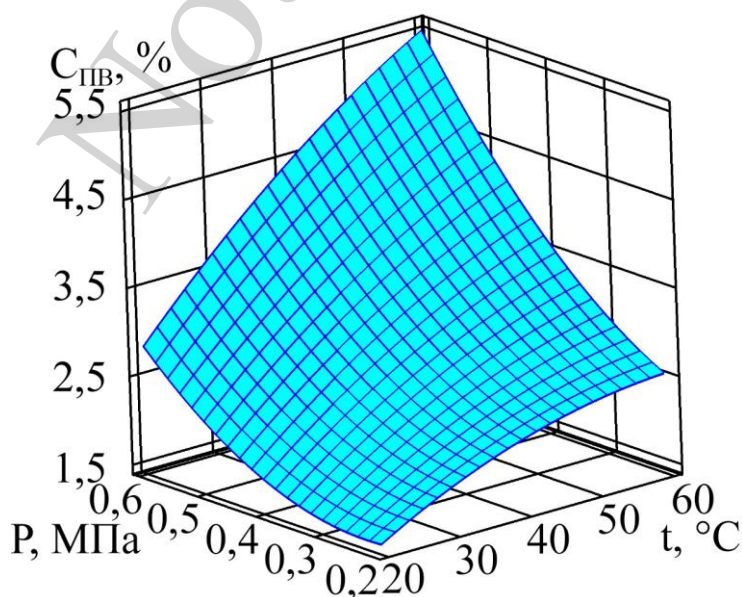


Рис. 4 Зависимость изменения концентрации ПВ от температуры ( $t$ ) и давления ( $P$ ) процесса УФ-концентрирования ПЭ для ПАН-100

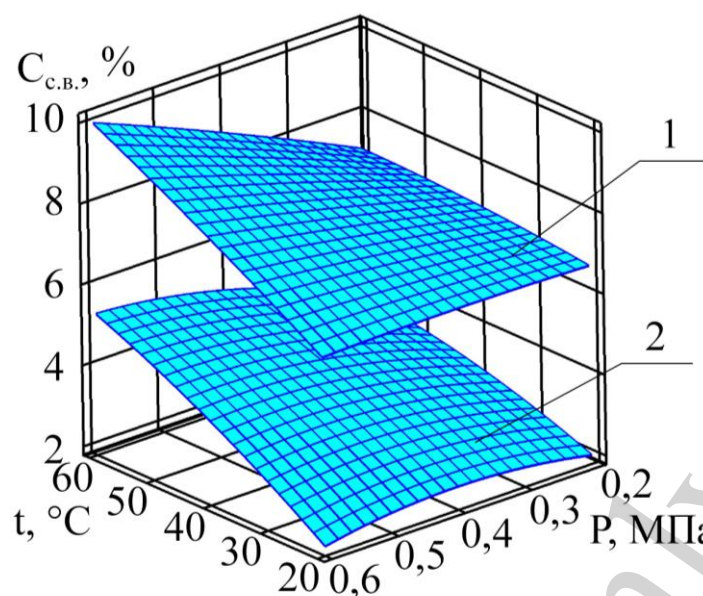


Рис. 5. Зависимость изменения содержания СВ от температуры ( $t$ ) и давления ( $P$ ) процесса УФ-концентрирования для ПАН-100: 1 – в концентрате; 2 – в пермеате

Снижение производительности полупроницаемых мембран с увеличением продолжительности процесса можно объяснить интенсивным образованием гель-слоя высокомолекулярных веществ на их поверхности, что значительно замедляет процесс УФ-концентрирования ПЭ. В режиме с вибрационным перемешиванием медленный характер уменьшения производительности УФ-мембран обусловлен влиянием вибрационной турбулизации на толщину гель-слоя, образующегося на их селективной поверхности.

#### 6. Обсуждения результатов определения рациональных параметров УФ-концентрирования пектинового экстракта для разработанного способа устранения гель-слоя

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных характеристик полученных ПК показал полное совпадение их значений по производительности и качественными характеристиками для обоих типов полупроницаемых мембран.

С помощью предложенной математической модели были определены условия проведения процесса УФ-концентрирования с применением двух видов полупроницаемых мембран типа ПАН. Результаты исследования, представленные в табл. 1, 2 и на рис. 4, 5, позволили определить рабочие параметры процесса ультрафильтрационного концентрирования пектиновых экстрактов с применением вибрационного перемешивающего элемента. По уравнениям регрессии (1)–(3) установлено, что наиболее рациональными технологическими режимами являются:

- температура экстракта  $t=35...45$  °С;
- длительность процесса  $\tau=(1,5-2,0) \cdot 60^2$  с;
- давление фильтрации  $P=0,4-0,5$  МПа;
- скорость вибрационного перемешивания  $U=1,5-1,7$  м/с.

Результаты показали, что зависимость производительности полупроницаемой мембраны ПАН-100, концентрации пектиновых веществ (ПВ) в концентрате, содержания сухих веществ (СВ) в пермеате и концентрате при различных технологических режимах имеют нелинейный характер. Это объясняется сложностью совокупного влияния технологических факторов процесса УФ-концентрирования ПЭ как на производительность полупроницаемой мембраны, так и на качественные показатели ПК. Аппроксимация данных уравнениями регрессии позволила выявить неоднозначные зависимости производительности УФ-мембран, концентрации ПВ и содержания СВ от давления, температуры и продолжительности процесса УФ-концентрирования ПЭ.

При повышении скорости пульсирующих потоков вибрационного перемешивания выше 1,5–1,7 м/с происходит стабилизация процесса, при этом производительность полупроницаемых мембран типа ПАН увеличивается всего в 1,3 раза. Это объясняется тем, что под действием давления пульсирующих потоков возникает уплотнение как слоя осадка, так и материала мембраны. Влияние перфорированной вибрирующей пластины достигает максимального значения производительности 4,6 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год для ПАН-100 и 4,2 дм<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·год для ПАН-50, при котором плотность гель-слоя становится постоянной.

Проведенные исследования имеют ограничения по параметрам температуры и давления, а также применению тупикового режима с одним видом полимерных УФ-мембран (ПАН). Недостатком данного исследования является трудность применения параметров процесса ультрафильтрации для другого вида сырья, а также неполное удаление образовавшегося поляризационного гель-слоя в связи с сильным его уплотнением на поверхности полимерной мембраны.

Полученные могут быть использованы при исследовании иных рабочих параметров процесса УФ-концентрирования пектиновых экстрактов, а также для разработки технического парка линий по производству пектинопродуктов из различного вида пектинсодержащего сырья.

Проведенные исследования являются продолжением исследований по усовершенствованию процессов мембранного концентрирования сырья животного и растительного происхождения с использованием полимерных полупроницаемых мембран и созданием методов устранения гель-слоя на их поверхности. Они представляют научно-практический интерес и их необходимо продолжать и развивать в направлении применения методов турбулизации процесса мембранной обработки пещевых высокомолекулярных полидисперсных систем.

## **7. Выводы**

1. Для реализации способа устранения гель-слоя с поверхности мембраны была предложена лабораторная установка для исследования процесса ультрафильтрационного концентрирования пектинового экстракта с вибрационным перемешиванием сырья. Получена математическая модель процесса ультрафильтрации по методу планирования факторного эксперимента. Приведены методики проведения эксперимента и статистического моделирования полученных результатов.

2. Определены факторы, влияющие на процес мембранного концентрирования пектинового экстракта с применением вибрационного перемешивания.

Установлено, что совокупное влияние параметров скорости перемешивания, температуры сырья и давления для процесса ультрафильтрации имеет неоднозначный характер. Это объясняется образованием не только гель-слоя, но и плотного поляризационного слоя на поверхности мембраны и усадкой мембраны при высоких значениях давления и температуры.

3. Результаты исследований и математического моделирования позволили определить рабочие параметры проведения процесса ультрафильтрационного концентрирования пектиновых экстрактов с использованием полупроницаемых УФ-мембран и с применением способа вибрационного перемешивания. Такими параметрами являются: давление – 0,4–0,5 МПа, температура обезжиренного молока – 35...45 °С, продолжительность процесса – (1,5–2,0)·60<sup>2</sup> с, скорость перемешивания – 1,5–1,7 м/с.

### Литература

1. Minzanova, S., Mironov, V., Arkhipova, D., Khabibullina, A., Mironova, L., Zakirova, Y., Milyukov, V. (2018). Biological Activity and Pharmacological Application of Pectic Polysaccharides: A Review. *Polymers*, 10 (12), 1407. doi: <https://doi.org/10.3390/polym10121407>

2. Vladislavljević, G. T., Vukosavljević, P., Bukvić, B. (2003). Permeate flux and fouling resistance in ultrafiltration of depectinized apple juice using ceramic membranes. *Journal of Food Engineering*, 60 (3), 241–247. doi: [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(03\)00044-x](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00044-x)

3. Тамова, М. Ю., Барашкина, Е. В., Журавлев, Р. А., Третьякова, Н. Р., Цыганкова, С. С. (2018). Инновационные способы получения пектина из различных видов растительного сырья. *Новые технологии*, 4, 79–84.

4. Stephen, A. M., Phillips, G. O. (Eds.) (2006). *Food Polysaccharides and Their Applications*. CRC Press, 752. doi: <https://doi.org/10.1201/9781420015164>

5. Ильина, И. А., Мачнева, И. А., Чернуцкий, А. П. (2018). Концентрирование и очистка пектиновых экстрактов методом ультрафильтрации. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*, 2, 45–48. doi: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2018/2/45-48>

6. Torkova, A. A., Lisitskaya, K. V., Filimonov, I. S., Glazunova, O. A., Kachalova, G. S., Golubev, V. N., Fedorova, T. V. (2018). Physicochemical and functional properties of Cucurbita maxima pumpkin pectin and commercial citrus and apple pectins: A comparative evaluation. *PLOS ONE*, 13 (9), e0204261. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204261>

7. Bhattacharjee, C., Saxena, V. K., Dutta, S. (2017). Fruit juice processing using membrane technology: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 43, 136–153. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.08.002>

8. Cai, M., Zhao, S., Liang, H. (2010). Mechanisms for the enhancement of ultrafiltration and membrane cleaning by different ultrasonic frequencies. *Desalination*, 263 (1-3), 133–138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.049>

9. Goma, H. G., Rao, S. (2011). Analysis of flux enhancement at oscillating flat surface membranes. *Journal of Membrane Science*, 374 (1-2), 59–66. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.011>

10. Lau, W., Ismail, A., Matsuura, T., Nazri, N., Yuliwati, E. (2015). Advanced Materials in Ultrafiltration and Nanofiltration Membranes. Handbook of Membrane Separations, 7–34. doi: <https://doi.org/10.1201/b18319-4>
11. Зелепукин, Ю. И., Зелепукин, С. Ю., Федорук, В. А., Бушмин, И. С. (2016). К вопросу производства пектина из свекловичного жома. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2, 238–242. doi: <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-238-242>
12. Echavarría, A. P., García-Valls, R., Torras, C., Pagan, J., Ibarz, A. (2012). Effect of Pectinase Immobilization in a Polymeric Membrane on Ultrafiltration of Fluid Foods. Separation Science and Technology, 47 (6), 796–801. doi: <https://doi.org/10.1080/01496395.2011.640095>
13. Yammine, S., Rabagliato, R., Vitrac, X., Mietton Peuchot, M., Ghidossi, R. (2019). Selecting ultrafiltration membranes for fractionation of high added value compounds from grape pomace extracts. OENO One, 53 (3). doi: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2019.53.3.2343>
14. Brião, V. B., Tavares, C. R. G. (2012). Pore blocking mechanism for the recovery of milk solids from dairy wastewater by ultrafiltration. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 29 (2), 393–407. doi: <https://doi.org/10.1590/s0104-66322012000200019>
15. Lutz, H. (Ed.) (2015). Ultrafiltration for Bioprocessing. Woodhead Publishing, 244. doi: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-18176-7>
16. Lobasenko, B. A., Semenov, A. G. (2013). Intensification of ultrafiltration concentrating by the separation of the concentration boundary layer. Foods and Raw Materials, 1 (1), 74–81. doi: <https://doi.org/10.12737/1560>
17. Castro-Muñoz, R., Barragán-Huerta, B. E., Fíla, V., Denis, P. C., Ruby-Figueroa, R. (2017). Current Role of Membrane Technology: From the Treatment of Agro-Industrial by-Products up to the Valorization of Valuable Compounds. Waste and Biomass Valorization, 9 (4), 513–529. doi: <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0003-1>
18. Yapo, B. M., Wathelet, B., Paquot, M. (2007). Comparison of alcohol precipitation and membrane filtration effects on sugar beet pulp pectin chemical features and surface properties. Food Hydrocolloids, 21 (2), 245–255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.03.016>
19. Deynychenko, G., Guzenko, V., Dmytrevskyi, D., Chervonyi, V., Kolisnichenko, T., Omelchenko, O. et. al. (2018). Study of the new method to intensify the process of extraction of beet pulp. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (11 (94)), 15–20. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140126>
20. Berk, Z. (2009). Food process Engineering and Technology. Academic Press, 624. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-373660-4.x0001-4>
21. Остапчук, М. В., Станкевич, Г. М. (2006). Математичне моделювання на ЕОМ. Одеса: Друк, 313.
22. Deinychenko, G., Mazniyak, Z., Kramarenko, D., Guzenko, V. (2015). Determination of ultrafiltration membranes shrinkage factor. Ukrainian Food Journal, 4 (2), 328–334.