

## ГИДРОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ МИКРО- И УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МОЛОКА И ТВОРОЖНОГО КАЛЬЕ

Ю. А. ГОРБУНОВА,  
аспирант,  
В. А. ТИМКИН,  
кандидат технических наук, доцент,  
Уральский государственный аграрный университет  
(620075, г. Екатеринбург, ул. К. Либкнехта, д. 42; тел.: 8 (343) 371-33-63)

**Ключевые слова:** ультрафильтрационный творог, баромембранная технология, творожное калье, керамические мембраны, ультрафильтрация, микрофильтрация, селективность мембран, проницаемость мембран.

Цель работы – исследование процессов микро- и ультрафильтрации при производстве творога. Изучена гидродинамика процессов микро- и ультрафильтрационного (МФ и УФ) разделения молока и творожного калье, разработаны рекомендации по внедрению в производство технологии, использующей мембраны отечественного производства. Исследования проводились в лабораторных условиях Уральского ГАУ на мембранной установке. В экспериментах использовались следующие типы мембран: листовые полисульфонамидные – УПМ-20; 50М, ацетатцеллюлозные – МФАС-ОС(1-4); УАМ-50П; 100П производства ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир), а также керамические мембраны серии КМФЭ и КУФЭ на основе диоксида титана (анатазной модификации) с нанесенным селективным слоем  $\alpha$ -оксида алюминия производства ООО НПО «Керамикфилтр» (г. Москва). Исследование процессов МФ-разделения обезжиренного молока и УФ-концентрирования творожного калье проводилось с целью установления зависимости основных характеристик процессов от типа мембран. Рассматривалось влияние следующих параметров на характеристики мембран: гидродинамические условия над мембраной и рабочее давление. В результате исследований по влиянию гидродинамических условий над мембраной и рабочего давления на процессы МФ- и УФ-разделения молока и творожного калье сделаны выводы: скорость потока продукта над поверхностью мембраны должна быть не менее  $u = 4,5$  м/с для процесса МФ и  $u = 3,0$  м/с для процесса УФ; рабочее давление процесса МФ должно быть в пределах  $P = 0,25$  МПа, процесса УФ в пределах  $P = 0,3$  МПа; керамические мембраны КМФЭ (0,8) и КУФЭ (0,01) могут быть рекомендованы как наиболее предпочтительные по сравнению с другими МФ- и УФ-мембранами для разделения молока и творожного калье.

## HYDRODYNAMICS PROCESS OF MICRO- AND ULTRAFILTRATION SEPARATION OF MILK AND CURD CALLE

Yu. A. GORBUNOVA,  
graduate student,  
V. A. TIMKIN,  
candidate of technical sciences, associate professor,  
Ural State Agrarian University  
(42 K. Liebknechta Str., 620075, Ekaterinburg; tel.: +7 (343) 371-33-63)

**Keywords:** ultrafiltration cheese, baromembrane technology, curd calle, ceramic membranes, ultrafiltration, microfiltration, membrane selectivity, membrane permeability.

The aim of the work – research of processes of micro- and ultrafiltrations by production of cottage cheese. Hydrodynamics processes of micro- and ultrafiltrational (MF and UF) division of milk and cottage cheese to a calle are studied, recommendations about introduction in production of the technology using membranes of a domestic production are developed. Researches were conducted in vitro in the Ural State Agrarian University on membrane installation. In experiments the following types of membranes were used: sheet polysulfonamide – UPM-20; 50M, acetylcellulose – MFAS-OS(1-4); UAM-50P; 100P of production of CJSC NTC “Vladipor” (Vladimir), and also ceramic membranes of the KMFE and KUFЕ series on the basis of dioxide of the titan (anatase modification), with the put selective layer  $\alpha$ -oxide of aluminum of production of LLC NPO “Keramikfiltr” (Moscow). Investigation of MF-separation of skimmed milk and UV-concentration of curd calle was conducted to determine the basic characteristics depending on the type of membrane processes. The study examined the effect of these parameters on the membrane characteristics: the hydrodynamic conditions of the membrane and the operating pressure. After analyzing the results of studies on the effect of hydrodynamic conditions on the membrane and the operating pressure on the processes of MF- and UV-separation of milk and curd calle, the authors make the following conclusions: the product flow rate over the membrane surface should be at least  $u = 4.5$  m/s for the MF-process and  $u = 3.0$  m/s for the UV-process; MF-process operating pressure must be in the range  $P = 0.25$  MPa, UV-process within  $P = 0.3$  MPa; KMFE ceramic membrane (0,8) and KUFЕ (0.01) can be recommended as the most preferred, compared with other MF and UV-membranes for separating milk and curd calle.

Положительная рецензия представлена Ю. С. Рыбаковым, доктором технических наук, профессором кафедры пищевой инженерии Уральского государственного экономического университета.

Образ жизни современного человека, повышение культуры питания приводят к тому, что одной из главных задач, стоящих перед технологами молочной промышленности, является разработка продуктов с повышенной пищевой и биологической ценностью, в полной мере обеспечивающих рацион потребителя полноценным белком [1, 8, 9]. Одним из таких продуктов является творожный сыр, или, как принято его называть – ультрафильтрационный творог (УФ-творог), получаемый баромембранной технологией [2, 4, 5, 10]. Эта технология позволяет сохранить в получаемом продукте сывороточные белки, а также примерно в два раза увеличить выход творога. Известно, что продукты, содержащие в достаточном количестве сывороточные белки, имеют короткий срок хранения [1], поэтому снижение количества микроорганизмов в исходном сырье является важным этапом переработки молока, повышающим безопасность конечного продукта и срок его годности. Как показывают исследования, применение для этой цели процесса микрофильтрации (МФ) позволяет сохранить разрушающиеся при высокотемпературной обработке компоненты молока и существенно повысить срок годности молочных продуктов [3, 6, 7].

В связи с этим представляет значительный интерес исследование гидродинамики процессов микро- и ультрафильтрационного (МФ и УФ) разделения молока и творожного казея, разработка на их основе рекомендаций по внедрению в производство технологии, использующей мембраны отечественного производства. Исследования проведены в лабораторных условиях Уральского ГАУ на мембранной установке (рис. 1). В экспериментах использовались следующие типы мембран: листовые полисульфонамидные – УПМ-20; 50М, ацетатцеллюлозные – МФАС-ОС(1-4); УАМ-50П; 100П производства ЗАО НТЦ «Владипор» (г. Владимир), а также керамические мембраны серии КМФЭ и КУФЭ на основе диоксида титана (анатазной модификации) с нанесенным селективным слоем  $\alpha$ -оксида алюминия производства ООО НПО «Керамикфильтр» (г. Москва). УФ-мембраны характеризуются «отсечками» по молекулярной массе 10; 30; 50; 100; 150 кДа.

Исследование процессов МФ-разделения обезжиренного молока и УФ-концентрирования творожного казея проводилось с целью установления зависимости основных характеристик процессов от типа мембран. Рассматривалось влияние следующих параметров на характеристики мембран: гидродинамические условия над мембраной и рабочее давление.

Процессы МФ и УФ проводят, как правило, при высоких скоростях разделяемой среды над поверхностью мембраны, что обусловлено низкой скоростью диффузии растворенных веществ с большой молеку-

лярной массой (более 500) и, как следствие, сильным влиянием концентрационной поляризации. Эти положения полностью подтвердились в экспериментах с обезжиренным молоком и творожным казея. Как видно из зависимости  $G(u)$  (рис. 2, 3), проницаемость мембран увеличивается с повышением скорости течения продукта над мембраной, что можно объяснить уменьшением толщины надмембранного слоя у поверхности мембраны, в котором происходит изменение концентрации. К тому же при невысоких скоростях локальная концентрация часто достигает такого предела, что на поверхности мембраны образуется гель, который значительно снижает проницаемость (рис. 3, штриховые участки), причем, чем выше проницаемость мембраны, тем больше должно быть значение  $u$  для преодоления процесса гелеобразования. Зависимость  $G(u)$  показывает (рис. 2), что проницаемость большинства МФ-мембран становится постоянной при скорости течения молока над мембраной  $u \geq 4,0$  м/с, что соответствует числам Рейнольдса, при течении в трубчатой мембране КМФЭ  $Re \geq 11400$ , при течении в плоском канале  $Re$

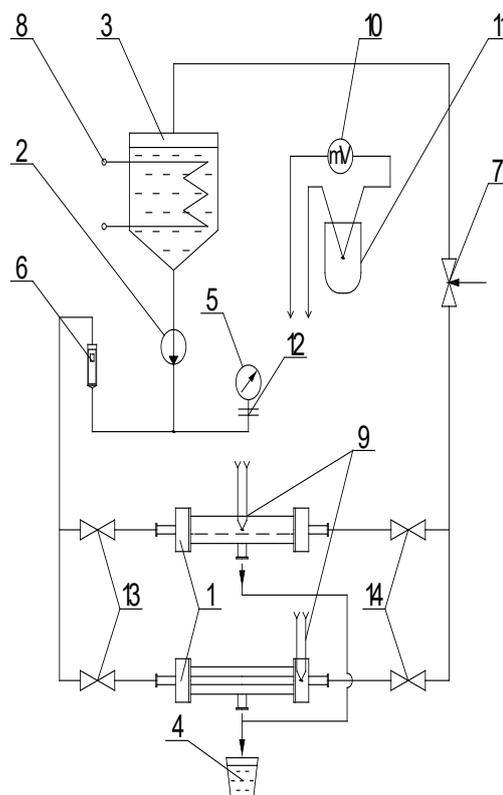


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования процесса МФ и УФ: 1 – мембранная ячейка; 2 – насос; 3 – циркуляционный бак; 4 – бак для пермеата; 5 – манометр; 6 – ротаметр; 7 – вентиль регулировочный; 8 – змеевик; 9 – термомпара; 10 – милливольтметр; 11 – сосуд Дьюара; 12 – разделитель; 13, 14 – вентили

Fig. 1. Scheme of the laboratory setup for the study of the MF- and the UF-process: 1 – cell membrane; 2 – pump; 3 – circulation tank; 4 – permeate tank; 5 – gauge; 6 – rotameter; 7 – adjusting valve; 8 – coil; 9 – thermocouple; 10 – millivoltmeter; 11 – Dewar vessel; 12 – separator; 13, 14 – valves

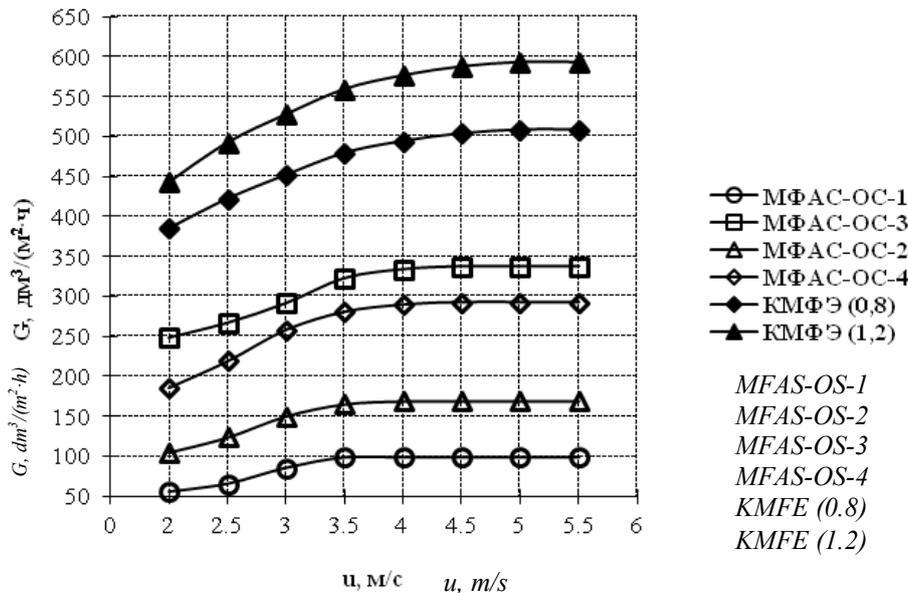


Рис. 2. Зависимость проницаемости МФ-мембран от скорости течения обезжиренного молока над мембраной при  $P = 0,25$  МПа,  $t = 35$  °С,  $C = 8,5$  % СВ  
 Fig. 2. Dependence of the MF-membrane permeability of the flow rate of skimmed milk over the membrane at  $P = 0.25$  MPa,  $t = 35$  °C,  $C = 8.5$  % DM

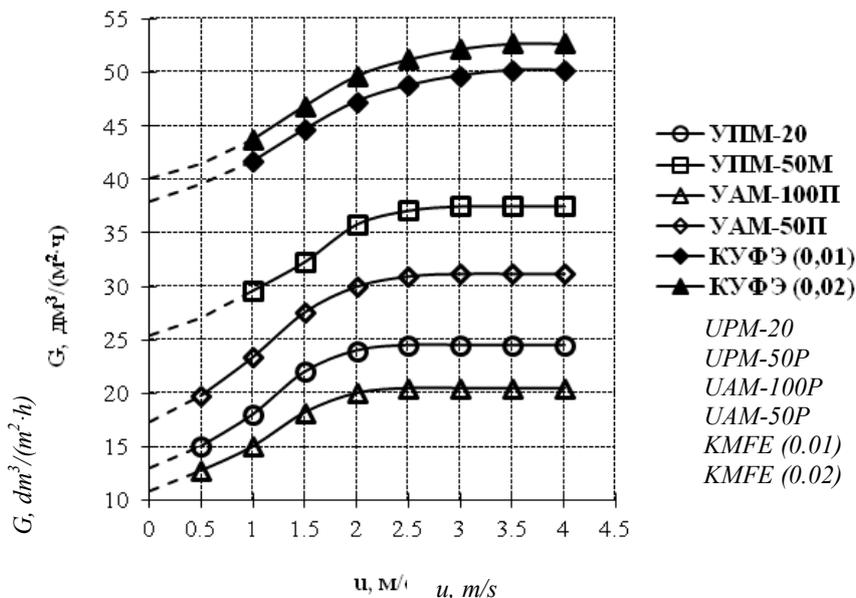


Рис. 3. Зависимость проницаемости УФ-мембран от скорости течения творожного калье над мембраной при  $P = 0,3$  МПа,  $t = 55$  °С,  $C = 12$  % СВ  
 Fig. 3. Dependence of permeability of UF-membranes on the speed rate of curd calle over a membrane at  $P = 0.3$  MPa,  $t = 55$  °C,  $C = 12$  % DM

$\geq 12000$ . Проницаемость большинства УФ-мембран (рис. 3) становится постоянной при скорости течения калье над мембраной  $u \geq 2,5$  м/с, что соответствует числам Рейнольдса, при течении в трубчатой мембране КУФЭ  $Re \geq 4450$ , при течении в плоском канале  $Re \geq 5000$ . Отсюда, на наш взгляд, можно сделать вывод, что для исключения значительного влияния концентрационной поляризации на процессы МФ и УФ можно на основании изложенного рекомендовать поддерживать скорость течения обезжиренного молока и творожного калье над мембраной в пределах  $u = 4,5$  м/с для процесса МФ и  $u = 3,0$  м/с для процесса УФ. Исходя из этого последующие эксперименты

проводились именно при таких скоростях течения продуктов над мембраной.

Влияние рабочего давления на характеристики мембран приведено на рис. 4, 5 ( $G(P)$ ) и 6, 7 ( $\varphi(P)$ ).

Зависимость  $G(P)$  показывает, что самой большой проницаемостью среди исследуемых МФ-мембран обладают мембраны серии КМФЭ (рис. 4), среди исследуемых УФ-мембран – мембраны серии КУФЭ (рис. 5), причем проницаемость с увеличением давления, несмотря на небольшой спад при  $P \geq 0,3$  МПа, у этих мембран постоянно растет. Это, по-видимому, можно объяснить более жесткой структурой данных мембран, не изменяющейся с увеличением рабочего

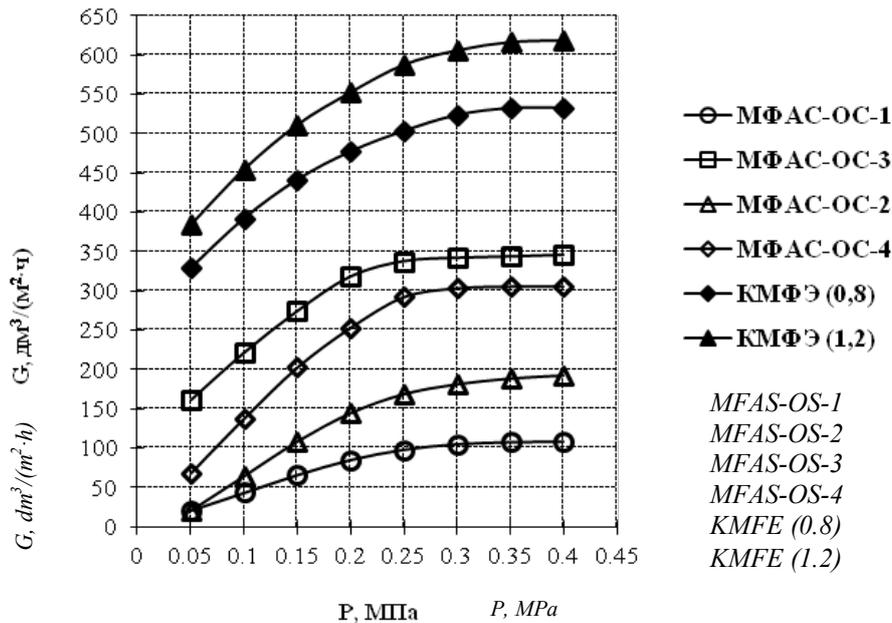


Рис. 4. Зависимость проницаемости МФ-мембран при разделении обезжиренного молока от давления при  $u = 4,5$  м/с,  $t = 35$  °С,  $C = 8,5$  % СВ

Fig. 4. Dependence of permeability of MF-membranes at division of skim milk from pressure at  $u = 4.5$  m/s,  $t = 35$  °C,  $C = 8.5$  % DM

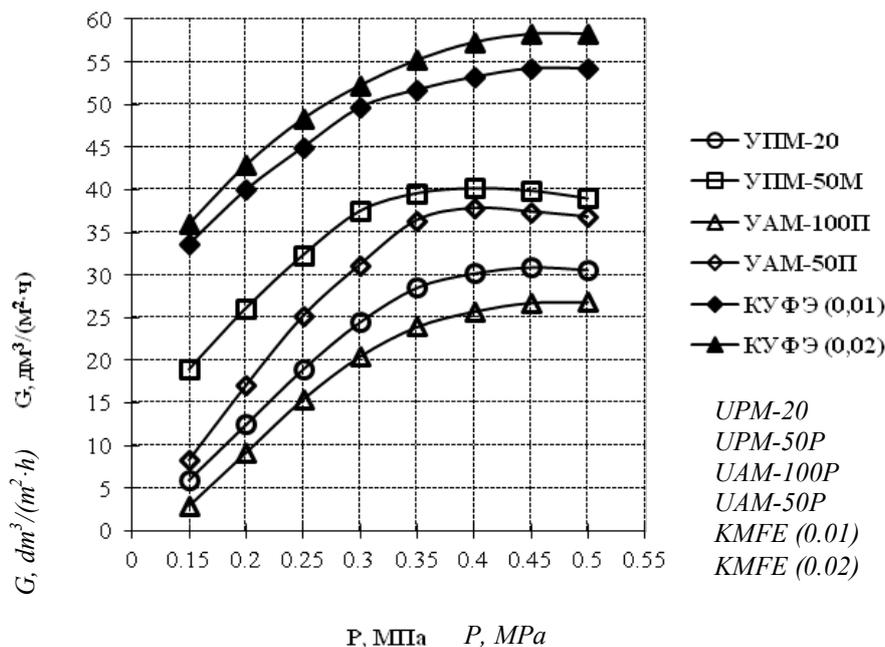


Рис. 5. Зависимость проницаемости УФ-мембран от давления (творожное калье) при  $u = 3,0$  м/с,  $t = 55$  °С,  $C = 12$  % СВ

Fig. 5. Dependence of permeability of UF-membranes on pressure (curd calle) at  $u = 3.0$  m/s,  $t = 55$  °C,  $C = 12$  % DM

давления. У мембран с менее жесткой структурой (полиамидных типа УАМ и УПМ) происходит некоторое снижение проницаемости с ростом давления (при  $P \geq 0,4$  МПа), особенно заметно это снижение проявляется у мембран с более высоким значением проницаемости.

Зависимость  $\phi(P)$  показывает, что селективность мембран изменяется с увеличением давления. Для МФ-мембран (рис. 6) наиболее ярко эти изменения выражены в области  $P = 0,2-0,3$  МПа. Наибольшую селективность (среди мембран МФАС-ОС) имеют мембраны с меньшей проницаемостью, они же более

чувствительны к изменению рабочего давления. Следует особо отметить мембрану КМФЭ (0,8), у которой селективность практически не зависит от давления и имеет значение 0,998. Для УФ-мембран (рис. 7) наиболее ярко эти изменения выражены в области  $P = 0,25-0,35$  МПа. Наибольшую селективность (среди мембран УПМ и УАМ) имеют мембраны с меньшей проницаемостью, они же более чувствительны к изменению рабочего давления. Следует особо отметить мембрану КУФЭ (0,01), у которой селективность практически не зависит от давления и имеет значение в рабочей области 0,985–0,987.

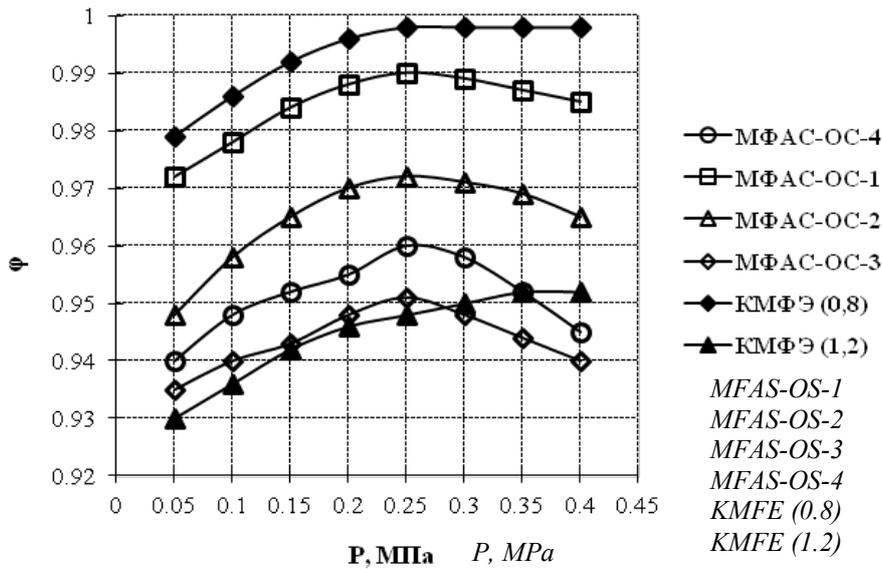


Рис. 6. Зависимость селективности по микрофлоре МФ-мембран при разделении обезжиренного молока от давления при  $u = 4,5$  м/с,  $t = 35$  °С,  $C = 8,5$  % СВ

Fig. 6. Dependence of selectivity on microflora of MF-membranes at division of skim milk from pressure at  $u = 4.5$  m/s,  $t = 35$  °C,  $C = 8.5$  % DM

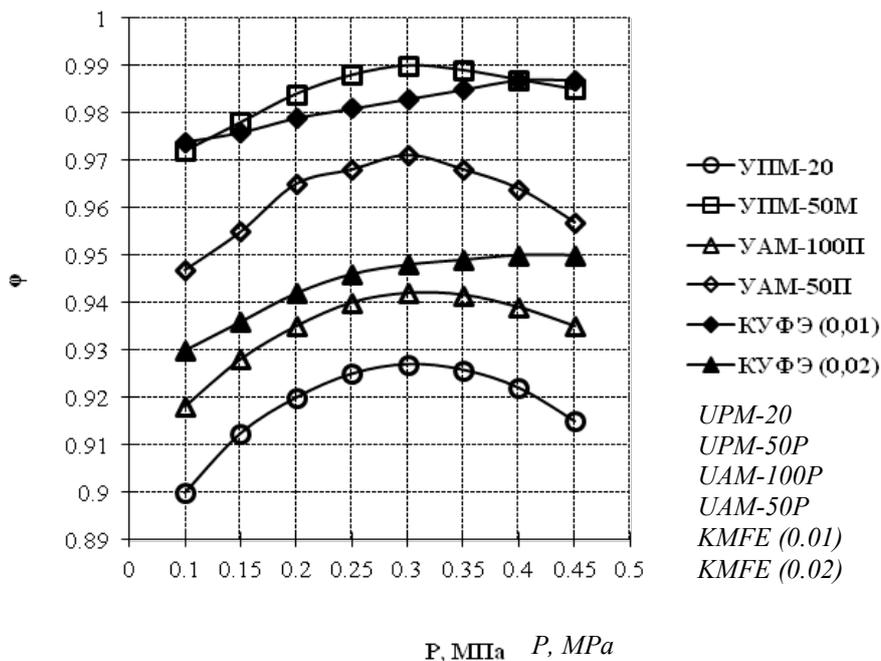


Рис. 7. Зависимость селективности УФ-мембран по белкам от давления (творожное калье) при  $u = 3,0$  м/с,  $t = 55$  °С,  $C = 12$  % СВ

Fig. 7. Dependence of selectivity of UF-membranes on proteins from pressure (curd calle) at  $u = 3.0$  m/s;  $t = 55$  °C,  $C = 12$  % DM

Таким образом, анализируя результаты исследований по влиянию гидродинамических условий над мембраной и рабочего давления на процессы МФ и УФ-разделения молока и творожного калье, можно сделать следующие выводы:

1) скорость потока продукта над поверхностью мембраны должна быть не менее  $u = 4,5$  м/с для процесса МФ и  $u = 3,0$  м/с для процесса УФ;

2) рабочее давление процесса МФ должно быть в пределах  $P = 0,25$  МПа, процесса УФ – в пределах  $P = 0,3$  МПа;

3) керамические мембраны КМФЭ (0,8) и КУФЭ (0,01) могут быть рекомендованы как наиболее предпочтительные по сравнению с другими МФ- и УФ-мембранами для разделения молока и творожного калье.

### Литература

1. Тимкин В. А., Лазарев В. А. Определение осмотического давления многокомпонентных растворов // Мембраны и мембранные технологии. 2015. № 1. Т. 5. С. 48–56.
2. Дренов А. Н., Лялин В. А. Производство творога на мембранных установках: качественно и рентабельность // Молочная промышленность. 2013. № 1. С. 42–43.

3. Зябрев А. Ф., Кравцова Т. А. Производство творога с применением ультрафильтрации // Переработка молока. 2008. № 10. С. 46–47.
4. Клепкер В. М., Гостищева Е. А. Особенности структурообразования творожных сыров с повышенным содержанием сывороточных белков // Молочная река. 2015. № 2. С. 24–26.
5. Лялин В. А., Груздев В. Л., Рушель Б., Рушель В. Производство молока длительного хранения методом мембранной стерилизации // Молочная промышленность. 2010. № 3. С. 16–18.
6. Пищиков Г. Б., Тимкин В. А., Горбунова Ю. А. Разработка баромембранной технологии УФ-творога // Аграрный вестник Урала. 2015. № 5. С. 47–49.
7. Фильчакова С. А. Аспекты развития промышленной технологии творога // Переработка молока. 2014. № 2. С. 30–32.
8. Тимкин В. А., Горбунова Ю. А., Пищиков Г. Б. Применение отечественных керамических мембран для производства биотворога // Пища. Экология. Качество : тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 19–21 марта 2015 г.) : в 2 т. Новосибирск, 2015.
9. Тимкин В. А., Минухин Л. А., Гальчак И. П., Лазарев В. А. Разработка баромембранной технологии переработки молочной сыворотки // Аграрный вестник Урала. 2013. № 7. С. 35–37.
10. Финна Й., Лялин В. А. Оборудование для производства питьевого молока длительного хранения без потери функциональных и вкусовых свойств // Молочная промышленность. 2014. № 2. С. 32–33.

#### References

1. Timkin V. A., Lazarev V. A. Determination of the osmotic pressure of multicomponent solutions // Membranes and membrane technology. 2015. № 1. Vol. 5. P. 48–56.
2. Drenov A. N., Lialin V. A. Cheese production in the membrane plants: high-quality and cost-effective // Dairy industry. 2013. № 1. P. 42–43.
3. Zyabrev A. F., Kravtsova T. A. Production of cheese using ultrafiltration // Processing of milk. 2008. № 10. P. 46–47.
4. Klepker V. M., Gostischeva E. A. Features of structure curd cheeses with a high content of whey protein // Milk river. 2015. № 2. P. 24–26.
5. Lialin V. A., Gruzdev V. L., Rushel B., Rushel V. Production of long shelf life milk by the method of membrane sterilization // The dairy industry. 2010. № 3. P. 16–18.
6. Pishchikov G. B., Timkin V. A., Gorbunov Yu. A. Development of UV-technology of baromembrane cheese // Agrarian Bulletin of the Urals. 2015. № 5. P. 47–49.
7. Filchakova S. A. Aspects of industrial technology of cottage cheese // Processing of milk. 2014. № 2. P. 30–32.
8. Timkin V. A., Gorbunova Yu. A., Pishchikov G. B. The use of ceramic membranes for domestic production bio cottage cheese // Food. Ecology. Quality : works of XII International scientific and practical conference (Moscow, March 19–21, 2015) : in 2 vol. Novosibirsk, 2015.
9. Timkin V. A., Minuhin L. A., Galchak I. P., Lazarev V. A. Development of technology for processing baromembrane whey // Agrarian Bulletin of the Urals. 2013. № 7. P. 35–37.
10. Finna J., Lialin V. A. Equipment for the production of drinking milk with no loss of functionality and taste properties // Dairy industry. 2014. № 2. P. 32–33.