

**Кузина Жанна Ивановна, гл.н.с., д.т.н.,
Маневич Борис Владilenович, зав. лаб., к.т.н., с.н.с.**
ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной
промышленности» (Россия, г.Москва)

ОСОБЕННОСТИ МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МОЛОЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И ОБОСНОВАНИЕ ПОДХОДА К ОЧИСТКЕ МЕМБРАН

Аннотация. В статье представлен обзор литературы по технологии ряда молочных продуктов, вырабатываемых баромембранным методом, виды отложений, образующихся на поверхности мембран в процессе ультрафльтрации молочного сырья. Изложены физико-химические свойства полимерных и металлокерамических мембран, некоторые конструктивные особенности ультрафльтрационных установок. Даны результаты собственных исследований и специалистов лаборатории санитарной обработки оборудования ВНИМИ по созданию средств санитарной обработки ультрафльтрационных установок.

Ключевые слова: мембранная технология, органические и неорганические отложения на поверхности мембран, моющие средства для регенерации мембран.

**Kuzina Zhanna Ivanovna, principal researcher, D.E.,
Manevitch Boris Vladilenovitch, laboratory chief, Ph.D., senior researcher**
All-Russian Dairy Research Institute (Russia, Moscow)

THE FEATURES OF THE MEMBRANE TECHNOLOGY OF DAIRY PRODUCTS MANUFACTURE AND VALIDITY OF THE APPROACH TO MEMBRANE CLEANING

Abstract. The literary review on the technology of a number of dairy products manufactured by the barometric method, types of deposits formed on membrane surfaces during milk raw materials ultrafiltration is presented in the article. The physical-chemical characteristics of the polymer and metal-ceramic membranes are some design features of the ultrafiltration units have been described. The results of the own and the specialists of the laboratory of sanitary equipment treatment of VNIMI investigations aimed at creation of the new means of the ultrafiltration units sanitary cleaning are presented.

Key words: membrane technology, organic and non-organic deposits on membrane surfaces, detergents for membranes regeneration.

В середине XX века появилась новая отрасль в науке и промышленности – мембранная технология, основанная на принципиально ином способе разделения жидких и газовых смесей – молекулярном фильтровании через полупроницаемые мембраны. В трудах таких ученых, как Храмцов К.А., Харитонов В.Д., Евдокимов И.А., Бабеньшев С.П., Свириденко Ю.Я., Тихомирова Н.А. и др. подробно представлены все виды баромембранных процессов: обратный осмос, ультрафильтрация, микрофильтрация, нанофильтрация, диализ и электродиализ [1-6]. Обзор литературы позволил установить, что из всех баромембранных процессов наибольшим вниманием и стремлением внедрения на молочных предприятиях является ультрафильтрация (УФ). Это связано с тем, что процесс ультрафильтрации позволяет легко стандартизировать продукт по содержанию белков. В концентрате повышается белковая и жировая фракции, а в пермеате – лактоза, минеральные соли и небелковые азотистые соединения. Наиболее широко в России используется ультрафильтрация с преимущественным использованием этого метода на предприятиях по производству детского питания. Для этих целей разработана технология получения творога из так называемого подсквашенного сгустка. Известно, что способы мембранной переработки молока позволяют создавать высококачественные продукты с наименьшим изменением их питательных свойств [7]. О ценности и важности сывороточных белков в лечебном, детском и профилактическом питании известно давно [8]. Ряд авторов сообщают, что к ним относятся β -лактоглобулин, α -лактоглобулин, иммуноглобулин, сывороточный альбумин, лактоферрин и лактопероксидаза. Производство биологически полноценных, безопасных молочных продуктов из натурального сырья с минимальными технологическими потерями стало возможным благодаря использованию мембранных технологий.

В результате научно-экспериментальных исследований технологов молочной промышленности появился безопасный и вкусный творожный продукт с высокой пищевой ценностью для детей школьного возраста. Авторами предлагаются две схемы производства творожных продуктов, коктейлей и напитков с использованием ультрафильтрованной сыворотки, представлены виды оборудования, с помощью которых достигается необходимый эффект. О широких возможностях применения мембранных процессов переработки молочного сырья сообщается в трудах Гаврилова и др. [9]. Сообщается о преимуществах ультрафильтрации при необходимости регулирования состава молока и подготовки его к технологическим операциям. Это относится к нормализации молока по белковому составу при получении стандартизированных продуктов, ультрафильтрации сквашенного сгустка при производстве творога, твердых и мягких сыров.

На интенсивность процесса ультрафильтрации большое влияние оказывает концентрационная поляризация [10]. Сущность её заключается в образовании на поверхности мембран пограничного слоя, в котором содержание растворенного вещества значительно выше, чем в основном объеме раствора. Кроме этого они отлагаются и в порах мембран, что приводит к значительному снижению скорости фильтрации (производительности). Концентрация отлагаемых веществ в виде наслоения, забивки пор и адсорбции

может быть настолько высокой, что на мембране образуется гель, особенно, если фильтрации подвергаются жидкости белково-жирового происхождения. В литературных источниках отмечено, что в зависимости от обрабатываемого сырья на мембранах образуются различные по структуре и составу отложения. Рядом исследователей установлено наличие на мембране вязкого желатиноподобного слоя. При ультрафильтрации молочной сыворотки в составе загрязнения были отмечены фосфат кальция и белки. В процессе переработки обезжиренного молока в загрязнениях были обнаружены белки в виде казеина и сывороточных белков. Авторы сделали вывод, что именно казеин играет важную роль в установлении гидродинамического сопротивления в системе установки. Ими установлено, что кроме казеина в загрязнении присутствовали β -лактоглобулин и α -лактальбумин. Кроме этого ими отмечено, что загрязнение по структуре состояло из двух слоёв: первый слой располагался непосредственно у поверхности мембраны и был более плотным, чем второй слой, что объясняется концентрационной поляризацией. А преимущественное содержание казеина в обоих слоях по сравнению с сывороточными белками авторы объясняют низким коэффициентом диффузии казеиновых мицелл и селективностью поверхностью мембран к высокомолекулярным компонентам. При ультрафильтрации подсырной сыворотки в отложениях на мембранах были обнаружены различные по структуре белковые вещества и бактерии. При этом загрязнение состояло из нескольких слоёв по степени плотности, которая была максимальной у поверхности мембраны. Реакция с протеазой позволила сделать заключение, что основную долю осадка составляет казеин молока. Наиболее интересными являются результаты исследований, полученные рядом авторов при изучении состава загрязнения, взятого с промышленной установки. Кроме белков в образце загрязнения были обнаружены жир, окислы алюминия, кремния, железа и кальция. Группой исследователей проводилось изучение процесса ультрафильтрации белка, лактозы, кальция и суммарного количества золы. Ими было отмечено, что все водорастворимые низкомолекулярные вещества свободно проходят через мембрану и не влияют на изменение скорости потока. Решающим фактором, оказывающим влияние на снижение скорости потока, является присутствие кальция, способствующего уплотнению высокомолекулярной белковой фракции молочного продукта.

Рядом авторов было отмечено, что на мембранах отлагаются не только неорганические (минеральные) и органические соединения, но и микрочастицы и микроорганизмы, которые представляются в виде прикрепленных к поверхности мембран микроорганизмов и в результате своей жизнедеятельности выделяющих слизистые вещества (внеклеточные полисахариды) с последующим образованием биопленок.

Таким образом, теоретически и практически показано, что главной составляющей отложений, образующихся на поверхности мембраны, являются белки различного происхождения и жиры, связанные кальцием. Этот вывод важен тем, что для стабильной работы ультрафильтрационных установок необходимо достижение полного удаления образующихся отложений. И в этом случае промывка водой и слабыми щелочными электролитами с рН в пределах

9,5-10,5 ед. недостаточна. Необходима своевременная очистка мембран эффективными рецептурами щелочных моющих средств, состоящих из смеси компонентов, индифферентных к свойствам мембран и к отложениям на них. Так как в основе мембранной технологии лежит концентрация высокомолекулярных веществ из молочного сырья, в частности, белка и жира, то и на мембранах, естественно, отлагаются эти компоненты. Давление в системе установок создает предпосылки к уплотнению слоя отложения непосредственно к поверхности мембран и к различной степени заполнению пор белково-жировыми и минеральными фракциями отложений. В связи с высокой степенью адгезии этих отложений на поверхности мембран необходимо применение жестких требований к средствам очистки и дезинфекции, продолжительности их воздействия и температурным параметрам. Минимальное количество остаточных частично гидролизованных белково-жировых фракций в дальнейшем способствует развитию нежелательной микрофлоры и необходимость применения более агрессивных способов очистки (регенерации) мембран.

Сложность очистки мембран заключается в том, что для полного гидролиза белковой фракции молока необходимы высокощелочные химические реагенты или ферменты. Для обеспечения доступа моющего раствора в поры обязательным условием является наличие в щелочном растворе поверхностно-активного вещества (ПАВ), выбор которого определяется по индифферентности его к мембране. С целью предотвращения когезии частично гидролизованных и растворенных в моющем растворе остатков загрязнений на поверхность мембран в моющем растворе необходимо наличие диспергатора.

С целью рационального подхода к разработке средств и режимов санитарной обработки ультрафильтрационных установок были изучены конструктивные особенности мембранной техники и физико-химических свойств мембран с позиций их регенерации. Известно, что до недавнего времени для изготовления ультрафильтрационных мембран использовали полимерные материалы (акрилонитрил (АН), ацетат целлюлозы (АЦ), полисульфон (ПСУ), полисульфон с тонким полиамидным покрытием (тонкопленочный композит, ТПУ), полиэфирсульфон (ПЭСУ), поливинилдифторид (ПВДФ), полипропилен (ПП), политетрафторэтилен (ПТФЭ)). Большинство из них (кроме полисульфона и полиэфирсульфона) чувствительны к высоким значениям рН и температуры, а также они могут повреждаться при механических нагрузках, в частности, при повышенных показателях рабочего давления. В связи с этим технологические параметры процесса ультрафильтрации постоянно нарушались, необходимо было часто проводить ферментативную очистку установки, что значительно повышало экономические затраты на технологию производства продукции. Мембраны из полисульфона и полиэфирсульфона более устойчивые по указанным ранее физико-химическим свойствам.

В последние годы зарубежными учеными были созданы металлокерамические мембраны с циркониевым (Zr), алюминиевым (Al) покрытием или с покрытием оксидом титана (TiO₂). Эти мембраны обладают высокой химической и термической стойкостью, что очень важно с позиций их

очистки и дезинфекции. С этих позиций наиболее рациональными следует признать мембраны, основой которых является керамический материал с покрытием из оксида алюминия. Эти мембраны устойчивы к высоким значениям рН растворов до 13 ед. и температуры до 80 °С. Но из-за их высокой стоимости чаще используют полимерные мембраны со сроком их эксплуатации до 2-х лет при соблюдении установленных разработчиком условий эксплуатации.

Немаловажными являются и конструктивные особенности мембранных установок: пластинчато-рамных, рулонных, спиральных, трубчатых и половолоконных. Авторами показаны преимущества и недостатки конструкций модулей в зависимости от применения их в различных процессах и видами мембран. Керамические мембраны используются только в трубчатых установках, а полимерные мембраны могут применяться как в трубчатых, так и в рулонных, пластинчато-рамных, половолоконных и рулонно-спиральных конструкциях.

Мойка мембранных установок требует осторожного подхода, так как большинство из них, как было ранее указано, недостаточно стойки к воздействию таких химических веществ как щелочного, так и кислотного характера. Некоторые из мембран нестойки и к высоким температурам. Особенно это касается спиральных мембранных модулей. Кроме этого, использование полимерного материала для изготовления мембран приводит к усталостному растрескиванию их при воздействии ряда ПАВ за счет изменения полярности мембранных пор и связанного с этим снижения проницаемости. Всё изложенное относится и к другим деталям фильтрующих установок: подложкам, прокладкам, несущим пластинам, клеям. В связи с этим существуют специальные требования к эксплуатации мембранного оборудования, к составам моющих средств, значениям рН их растворов, температурным параметрам и давлению в системе при проведении процесса мойки. С целью правильного выбора химических средств и режимов мойки мембран необходимо знать, какой продукт подвергался фильтрации и в течение какого времени. Чем длительнее процесс, тем большее количество загрязнений образуется на поверхности мембран, тем выше должна быть концентрация моющего раствора и продолжительность процесса мойки.

Предварительно нами были проведены исследования индифферентности новых экологически безопасных ПАВ по отношению к полимерным и керамическим мембранам, что позволило выявить 5 видов ПАВ, которые практически не влияли на водопроницаемость испытуемых мембран. С целью импортозамещения была создана смесь двух ПАВ – Композиция 1, которая не уступала по индифферентности от остальных исследованных ПАВ. С целью определения её активных свойств были проведены исследования поверхностного натяжения выявленных ПАВ и созданной композиции. Результаты исследований представлены в таблице 1. Следует отметить, что наименьшая величина поверхностного натяжения соответствует оптимуму всех свойств ПАВ, их критической концентрации мицеллообразования. Полученные результаты указывают на рациональные концентрации исследованных ПАВ, то есть, в пределах от 1 до 3 % содержания в концентрате моющего средства.

Таблица 1 – Зависимость поверхностного натяжения различных видов ПАВ от температуры при концентрации растворов 0,03 % по основному веществу

№№ п/п	Наименование ПАВ	Температура эксперимента, °С							
		25	30	40	50	60	70	80	90
1	Lutensol XP 60	20	19	19	18	17	16	15	14
2	Lutensol XL 70	24	22	20	19	19	19	19	19
3	Dehyton PL	27	25	20	19	19	19	19	19
4	Lutensol XL 40	29	27	24	23	22	20	18	18
5	Sulfopon 1216 G	37	32	29	26	25	24	24	24
6	Композиция 1	38	33	31	28	26	25	25	25
7	AG 6206	44	41	39	36	33	31	29	26

Дальнейшие исследования по эмульгирующей способности в отношении смеси молочного и растительного жиров (1:1) проводили с Композицией 1. В результате экспериментов установлено, что она обладает высокой степенью эмульгирования смеси жиров, до 89-100 % в зависимости от концентрации (0,02-0,07 %).

Проведенные эксперименты позволили определить, что практически все виды ПАВ обладают свойством снижения поверхностного натяжения с повышением температуры, что указывает на рациональность проведения процессов санитарной обработки в интервале повышенных температур. В результате исследований выявлены рациональные ПАВ по показателю поверхностного натяжения (σ находилась на уровне $20-41 \cdot 10^{-3}$). Эти параметры указывали на высокие моющие способности исследованных ПАВ. И только НПАВ - низкопенный алкилглюкозид, имеющий показатель поверхностного натяжения свыше $40 \cdot 10^{-3}$ н/м практически не обладал ни смачивающей, ни эмульгирующей способностями, как показали результаты дальнейших исследований. В связи с этим он не обеспечит доступ щелочных электролитов и других субстанций к отложениям на поверхности мембраны и тем более в её поры. Однако он может использоваться в определенных соотношениях со смачивающими веществами для достижения стабильности внешнего вида моющих композиций (прозрачности, отсутствия раздела фаз, помутнения, образования геля или осадка), а также обеспечивать синергизм моющего действия определенных видов ПАВ и устойчивость их в щелочных электролитах. Но по степени устойчивости в щелочных концентратах (до 38-40% основного вещества) исследованные ПАВ не отвечали требованиям. ПАВ даже при введении в щелочной концентрат в количестве одного процента высаливался, происходило расслоение концентрата на щелочной слой, нижний и верхний - ПАВ. А НПАВ на основе спиртов Гербе сохраняли устойчивость в растворах гидроксида натрия только до 5 % его содержания. Необходимой степенью устойчивости обладал лишь не пенный алкилглюкозид, но по физико-химическим свойствам для решения поставленной задачи он не отвечал требованиям ни по показателю поверхностного натяжения, ни по эмульгирующей способности. В результате экспериментов установлено, что Композиция 1 устойчива к концентрату гидроксида натрия (39 % основного вещества). Преимущество этой композиции состоит ещё и в том, что она может применяться как в виде добавки путем дозированного введения (0,015-0,025 %)

в рабочие растворы гидроксида натрия (1,0-1,5 %), так и в концентрированный раствор (35-39 %) в концентрации 1,0-2,5 %.

По показателю поверхностного натяжения щелочные моющие композиции в виде концентрированных растворов гидроксида натрия в смеси с Композицией 1 отвечали поставленной задаче.

В качестве дезинфицирующего средства наиболее рациональным и по экологичности, и по воздействию на свойства мембран наиболее рациональным следует принять средство на основе двух кислородсодержащих субстанций. Оно представляет собой бесцветную прозрачную (возможна опалесценция) жидкость со специфическим запахом, хорошо растворяющуюся в воде в любых соотношениях. В качестве действующих веществ (ДВ) средство содержит перекись водорода (ПВ) H_2O_2 – (20,0±5,0) % и надуксусную кислоту (НУК) $CH_3C(O)OOH$ – (15,0±1,5) %; кроме этого, в состав входят функциональные компоненты. Плотность средства при 20°C – (1,15±0,03) г/см³. Показатель активности водородных ионов (рН) водного раствора средства с массовой долей 1 % – 2,2±0,5 ед.

При проведении экспериментов *in vitro* для контаминирования тест-объектов были подготовлены микробные суспензии *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Streptococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* и *Salmonella typhimurium* в концентрациях $(1,0-3,5) \cdot 10^8$ КОЕ в 1 см³. В таблице 2 представлены результаты микробиологического контроля смывов с поверхностей тест-объектов.

Таблица 2 – Бактерицидная активность рекомендуемого средства на основе кислородсодержащих субстанций

Тест-Микроорганизмы	До обработки		После обработки		
	Контроль	log	КОЕ*	lg	RF**
<i>Escherichia coli</i>	$1,0 \cdot 10^8$ КОЕ	8,00	≤ 30	≤ 1,48	— / ≥ 6,52
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	$1,4 \cdot 10^8$ КОЕ	8,15	< 10 ²	< 2,00	— / ≥ 6,15
<i>Streptococcus faecalis</i>	$3,5 \cdot 10^8$ КОЕ	8,54	< 10	< 1,00	— / ≥ 7,54
<i>Staphylococcus aureus</i>	$2,2 \cdot 10^8$ КОЕ	8,34	< 10	< 1,00	— / ≥ 7,34
<i>Salmonella typhimurium</i>	$1,4 \cdot 10^8$ КОЕ	8,15	≤ 50	≤ 1,70	— / ≥ 6,45

Примечание:

* Максимальное число КОЕ в 3-х опытах

** В числителе знак “—” - отсутствие роста тест-культур (RF>5).

Суспензии готовили с добавлением 10 % стерильного цельного молока (м.д. жира 3,5 %) в качестве белковой нагрузки. Эксперименты были проведены при концентрациях рабочего раствора средства ~0,11 % по препарату (~0,015 % по ДВ-НУК) и экспозиции 15мин. Массовая доля НУК в рабочем растворе ~0,015 %; массовая доля ПВ в рабочем растворе ~0,024 %; плотность концентрата средства при 20 °C – 1,158 г/см³.

Препараты на основе НУК и перекиси водорода являются более щадящими по отношению к мембранам, чем хлорные агенты, после обработки которыми релаксационные характеристики некоторых видов мембран приходят в норму лишь через 8-10 часов.

На базе многочисленных проведенных стендовых и производственных апробаций были разработаны режимы регенерации (санитарной обработки)

ультрафильтрационных установок, укомплектованных как полимерными, так и керамическими мембранами [11], что отражено в таблице 3.

Однако из-за высокой стоимости ультрафильтрационного оборудования отечественные предприятия с осторожностью относятся к отечественным разработкам моющих средств. Известно лишь, что в качестве дезинфицирующего средства некоторые предприятия применяют дезинфектант на основе перекиси водорода и надуксусной кислоты, созданной ВНИМИ.

Таблица 3 – Технологические режимы санитарной обработки (регенерации) ультрафильтрационных установок

Операции	Агенты	Время, мин	Температура, °С	pH среды, ед.
1. Ополаскивание от остатков продукта	Вода	10-15	18 ± 2	6,5-7,5
2. Рециркуляция воды, нагрев	Вода	15-20	80 - 85	6,5-7,5
3. Щелочная мойка в контуре установки	"Катрил-УФ" в смеси с "Катрил М" марка "Н"	40-45	80 - 85	12,7-12,9
5. Ополаскивание от остатков щелочного раствора	Вода	15-20	35-50	6,5-7,5
6. Кислотная мойка	Азотная к-та в смеси с "Катрил М" марка "Н" или "РОМ-ФОС марка А - УФ"	20-30	50-55	1,3-1,4
7. Ополаскивание от остатков кислотного раствора	Вода	15-20	35-50	6,5-7,5
8. Щелочная мойка в контуре установки	"Катрил-УФ" в смеси с "Катрил М" марка "Н"	25-30	80 - 85	12,7-12,9
9. Дезинфекция раствором дезинфектанта или стерилизация водой	Перекись водорода или "Катрил-Дез" или вода	10-12 15 - 17	20 -30 85 - 90	6,5 - 7,5
10. Ополаскивание от дезинфицирующего раствора	Вода	10 - 12	18 ± 2	6,5 - 7,5

Примечание. Периодически, но не реже 1 раза в неделю необходимо проводить профилактическую мойку УФ-установки раствором ферментного (энзимного) средства фирмы "Даверси" - "Дивос 98 ПЕ" или раствором "Катрил-УФ" в концентрации 0,5 % в смеси с "РОМ-АЦ-1" марка "2" концентрацией 0,1-0,2 %.

Выводы. Важным условием метода мембранного фильтрования является согласованность производителей мембранного оборудования и производителей продуктов в выборе нужного вида и мембран, и конструкций фильтровального аппарата. Необходимость согласованности диктуется тем, что все мембраны отличаются по физико-химическим свойствам, а именно стойкостью к химическим агентам, которые необходимо будет использовать для регенерации мембран в зависимости от фильтруемого сырья и соответственно, от тех отложений, которые образуются на мембранах в процессе производства молочного продукта. Пренебрежение этими условиями может привести к необратимому повреждению мембран.

При фильтрации молочного сырья необходимо неукоснительно соблюдать рекомендации фирм-изготовителей мембран. Повышение температуры технологического процесса провоцирует повреждение мембран, его активного слоя. А увеличение продолжительности технологического

процесса сверх указанного времени и повышение давления в системе мембранного аппарата способствует образованию белково-жирового геля и его уплотнению на поверхности мембран и что очень опасно, полному забиванию пор мембран. Все эти факторы впоследствии потребуют значительных усилий для очистки мембран. Как правило, понадобится проведение мойки ферментными средствами. Как показала практика, в любом случае понадобится проведение мойки ферментными растворами, но профилактически 1 раз в неделю и с меньшей экспозицией.

При любом виде мембранного фильтрования органических жидкостей необходимо соблюдать определенные требования к используемой воде в процессах промывки от остатков фильтруемого сырья, затем щелочных, кислотных и дезинфицирующих растворов, а также воде, используемой для приготовления рабочих моющих растворов.

Список литературы

1. Храмцов А.Г. Доктрина инновационных технологий молочных продуктов – возможности реализации // Молочная промышленность. 2008. № 4. С. 64-67.
2. Харитонов В.Д., Димитриева С.Е., Фриденберг Г.В., Анисимов С.А., Зябрев А.Ф., Кравцова Т.А., Горячий Н.В. Современные мембранные технологии для производства высококачественных молочных продуктов // Материалы международной научно-практической конференции «Молочная индустрия». М.: АНО «Молочная промышленность», 2009. С. 90.
3. Евдокимов И.А. Развитие мембранных технологий: рациональность и безотходность // Молочная промышленность. 2010. № 12. С. 37-38.
4. Бабенышев С.П., Евдокимов И.А. Повышение проницаемости мембран при разделении жидких полидисперсных систем // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 8. С. 72-74.
5. Свириденко Г.М., Захарова М.Б. Санитарно-гигиенический контроль сыродельного производства // Сыроделие и маслоделие. 2009. № 1. С. 4-5.
6. Тихомирова Н.А. Нанотехнологии в переработке молочного сырья // Молочная промышленность. 2008. № 4. С.68-70.
7. Дренов А.Н., Лялин В.А. Производство творога на мембранных установках: качественно и рентабельно // Молочная промышленность. 2013. №1. С. 42.
8. Агаркова Е.Ю., Фриденберг Г.В., Будрик В.Г., Березкина К.А. Новые технологии производства молочных продуктов, разработанные на основе баромембранных методов // Молочная река. 2012. № 1 (45). С. 42-43.
9. Гаврилов Г.Б. Технология мембранных процессов переработки молочной сыворотки и создание продуктов с функциональными свойствами. М.: Россельхозакадемия, 2006. 134 с.
10. Свитцов А.А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2007. 208 с.
11. Маневич Е.Б. Регенерация мембран ультрафильтрационных установок // Молочная промышленность. 2012. № 10. С. 33-34.