

## ОТЗЫВ

**официального оппонента о диссертационной работе Богомолова Владимира Юрьевича «Разработка и научное обоснование процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых производств**

Диссертант в автореферате привел данные Международной молочной ассоциации, согласно которым половина молочной сыворотки, получаемой в мире, попадает в сточные воды. Однако приведенные данные являются средними величинами. Профессор И.А. Евдокимов привел данные по использованию молочной сыворотки в различных регионах мира. Если в США и Западной Европе сброс в стоки молочной сыворотки отсутствует, то в нашей стране он составляет 22.4 %, а 64% продаётся животноводческим фермам. В связи с удорожанием транспортных перевозок продажа сыворотки становится все менее рентабельной. Однако приведенные факты только подчеркивают высокую актуальность проблемы решаемой диссертантом для нашей страны, поскольку молочную сыворотку применяют в косметике, для изготовления спортивного и детского питания, мороженого, гипотензивных препаратов, как пищевых добавок.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы и приложений. **Первая глава** является обзором литературы, в котором акцент сделан на отечественные работы, большей части воспроизводящие зарубежные технологические аналоги при отсутствии характеристик современных рулонных аппаратов и аппаратов с полыми волокнами. Среди российских ученых, которые опередили мировые достижения был синтез ядерных мембран для микро- и ультрафильтрации Г.Н. Флёровым в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (Дубна). Эти мембраны отличает от других изопористость. Г. Н. Флёров был и остаётся выдающимся представителем отечественной науки

и в его честь элемент № 114 Периодической системы Д.И. Менделеева назван флеровием.

**Во второй главе** описана техника экспериментальных исследований. В ней приведены характеристики используемых в работе мембран, изготовленных ЗАО НТЦ «Владипор», а также составы промышленных и модельных растворах и сделан справедливо акцент на содержании белков и витаминов. В главе приведены схемы мембранных установок, среди которых есть в частности, установка для исследования диффузионного потока, не имеющая отношения к решаемой проблеме, так как диффузия является пассивным транспортом, направленным от высоких отрицательных градиентов химического потенциала, а ультрафильтрация относится к активному транспорту веществ через мембраны, осуществляемому против градиента химического потенциала. Если даже математические модели используют коэффициенты диффузии, то данная методика ограничена измерением эмпирических коэффициентов диффузионной проницаемости, часто применяемых в связи с отсутствием методов определения концентраций веществ на границах мембран, что было бы необходимо для определения коэффициентов диффузии. Использование равновесных коэффициентов распределения также приводит к значительным ошибкам в связи с неравновесностью баромембранных процессов. В то же время нет детального описания ультрафильтрационной установки. Методики анализа веществ по общей традиции принято приводить не в приложении, а в материале этой главы.

**Третья глава** диссертации содержит результаты исследования маспереноса белков через мембраны УАМ-150, УПМ-100 и УПМ-К. Лучшие результаты были получены при использовании мембраны УПМ-100, которая позволяла получить коэффициенты задержания близкие к 0.98. Материал главы содержит наиболее оригинальные данные по использованию импульсного режима при ультрафильтрации молочной сыворотки.

Было установлено, что коэффициенты задержания белков увеличиваются при увеличении плотности тока в прикатодной секции электроультрафильтрационного аппарата и уменьшаются в прианодной секции.

**Четвертая глава** включает эмпирические математические модели процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации молочной сыворотки. Модели основаны на простых линейных соотношениях, которые однако приводят скорее к экспоненциально убывающей зависимости коэффициента задержания сывороточных белков от концентрации исходного раствора, чем к линейным уравнениям. Обращает на себя внимание различный характер рассчитанных и экспериментальных кривых (выпуклые для экспериментальных кривых и вогнутые для рассчитанных).

**В пятой главе** диссертации описано технологическое оформление процесса ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации молочной сыворотки. При анализе продуцирования джоулева тепла приведены линейные соотношения для последовательного соединения семи сопротивлений, для которых не приведены данные. Очевидно, что можно было бы некоторыми электросопротивлениями пренебречь при расчете. Предложенная диссертантом схема была успешно реализована на ООО «Бондарский сыродельный завод». Проведен расчет экономической эффективности ультрафильтрационного концентрирования и деминерализации подсырной сыворотки и получения сухого сывороточного концентрата. Учтены высокие энергозатраты при его сушке.

Общая оценка достоверности и степени обоснованности работы не вызывает сомнений, так как метод реализован в виде промышленного образца и испытан на предприятии. Новизна работы заключается в использовании при ультрафильтрации в качестве действующей обобщенной термодинамической силы дополнительно к градиенту давления градиента электрического потенциала. Так как известно множество аппаратов для деминерализации и концентрирования сыворотки, то для оценки новизны рабо-

ты большое значение имеет отличительный признак созданного аппарата. Он состоит в использовании импульсного режима подачи электрического тока в аппарат для уменьшения производства джоулева тепла.

Замечания по работе:

1. Известно множество вариантов аппаратов для баромембранного разделения смесей, которые применяют для выделения белков из молочной сыворотки. Следовательно, было необходимо сравнить эффективность решения поставленной задачи с помощью аппарата, предложенного диссертантом, с другими типами и вариантами аппаратов, в том числе рулонного типа и аппарата с полыми волокнами.

2. Одной из причин применения импульсного режима подачи электрического тока, по мнению диссертанта, является перегрев аппарата, однако в работе нет зависимостей роста температуры от времени и плотности электрического тока. Кроме того, нет оптимизации геометрических параметров аппарата, что позволило бы минимизировать выделение джоулева тепла. Например, при электродиализе с аппаратами завода «Гамбовмаш» с межмембранным расстоянием 2 мм выделялось значительно больше теплоты, чем в оптимизированных электродиализаторах с межмембранным расстоянием 0.5 мм, которое обеспечивало меньшее сопротивление аппарата.

Приводимые зависимости параметров электроультрафильтрации от температуры могли бы быть полезно использованы для расчета энергии активации процесса с помощью уравнения Аррениуса, что открыло бы путь к пониманию сущности мембранных методов разделения веществ.

3. При исследовании сорбции не было обращено внимание на то, что ацетатцеллюлозные мембраны являются не инертными сорбентами, а слабыми катионообменниками, которые на кафедре коллоидной химии Санкт-Петербургского университета даже применяли при электродиализе.

4. В приложении Б (страницы 146-164) погрешность имеет значения вплоть от  $10^{-5}$  до  $10^{-7}$  %, что очень далеко от реальной величины воспроизводимости, которую согласно правилам ИЮПАК следует давать в величинах относительного стандартного отклонения.

5. Теории служат либо для проникновения в сущность исследуемых процессов, либо для прогноза результатов. В первом случае используют микроскопические теории, о которых в работе не идет речи. Во втором используют макроскопические теории, которые оценивают дробью, в числителе которой число предсказываемых результатов, а в знаменателе число необходимых экспериментов. Эмпирические теории, приводимые в данной работе можно заменить обработкой экспериментов с помощью наименьших квадратов и использованием программ типа Origin или эквивалентных ей. В этом случае число предсказываемых результатов будет более точным. В математических моделях не использовано уравнение Навье-Стокса для описания конвекции и уравнение Фика для описания диффузии, замененные на линейные соотношения.

Диссертационная работа является завершенным исследованием, в котором не только проведено экспериментальное исследование, но результаты обсуждены и реализованы в виде опытных аппаратов. Результаты работы опубликованы в 13 научных публикациях, среди которых 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, патенте и свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ. Качество оформления в целом хорошее, несмотря на то, что многие графики оформлены не по общепринятым нормам. Автореферат отражает основные результаты диссертационной работы. К этому следует добавить, что работа была выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», Фонда содействия развитию малых форм предприятий и научно-технической сфере и проекта

