

В диссертационный совет Д 212.196.07
на базе ФГБОУ ВО «РЭУ
им. Г.В. Плеханова»

О Т З Ы В

официального оппонента доктора технических наук, профессора ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г. Разумовского (ПКУ)» **Петрова Сергея Михайловича** на диссертационную работу Славоросовой Елены Викторовны на тему «Разработка кристаллизатора-выпаривателя для переработки НФ-концентрата молочной сыворотки», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств (технические науки)

Актуальность избранной темы

Согласно утвержденной правительством Российской Федерации стратегии развития машиностроения для пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года перспективы сегмента оборудования для молочной промышленности связаны с расширением продуктовой линейки отечественной молочной отрасли. Для дальнейшего развития подотрасли необходимо создание современного оборудования для глубокой переработки молока и побочных продуктов, в том числе установок для нано-, микро- и ультрафильтрации, электродиализа, гидролиза, кристаллизации, ферментации.

Пищевая и перерабатывающая промышленность Российской Федерации направлена на обеспечение населения страны безопасной и качественной пищевой продукцией и обеспечение высоких стандартов экологической безопасности предприятий. Молочная промышленность стоит перед проблемой переработки вторичного сырья, в особенности на предприятиях малой мощности. В частности, творожная и подсырная

сыворотка, обладающая уникальной биологической ценностью, на таких предприятиях практически не используется на пищевые цели из-за отсутствия оборудования для ее переработки, рассчитанного на малую мощность. По данным консалтинговой компании «НЭО Центр» в России на дальнейшую переработку уходит только 21 % молочной сыворотки. Остальное количество идет либо на корм сельскохозяйственным животным, либо вообще не используется и сливается на поля или в сточные воды. Полноценная эффективная переработка сыворотки сдерживается в основном устаревшим энергозатратным технологическим оборудованием многих молочных предприятий.

Поэтому разработка устройства для переработки основного вторичного ресурса молочной промышленности – сыворотки, имеющего перспективу использования на малых предприятиях, является актуальной темой диссертационного исследования.

Степень обоснованности научных положений, выводов, рекомендаций и их достоверность

Основные положения, выносимые диссертантом для публичной защиты, прошли успешную апробацию в рамках научных конференций российского и международного уровней. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 19 печатных работах, из которых 7 статей в рецензируемых научных изданиях и получены 2 патента Российской Федерации на изобретение.

Печатные работы, а также автореферат диссертации полностью отражают содержание работы и подтверждают личный вклад автора в разработку научной проблемы, определяемой целью диссертации.

Обоснованность и достоверность научных положений, результатов исследования, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечена корректностью поставленных задач, применением основных уравнений переноса массы и теплоты при анализе рассматриваемых

процессов переработки молочной сыворотки, использованием критериальных уравнений переноса количества движения и теплоты, адекватностью используемых моделей. В работе проанализировано большое количество публикаций по исследуемой тематике, обобщены текущие результаты по каждой из поставленных в работе задач, сделаны выводы об уровне полноты знания в современной науке по каждому из исследуемых автором аспектов.

Научная новизна результатов исследования

Научная новизна диссертационной работы Славоросовой Е.В. состоит в следующем:

- в теоретическом обосновании сложных тепло- и массообменных процессов, происходящих в кристаллизаторе-выпаривателе с воздушным и водяным охлаждением и подогревом, зависящих от физических свойств теплоносителей и физико-химических свойств НФ-концентрата, а также продолжительности циклов нагрева и охлаждения продукта;
- в получении новых экспериментальных результатов исследований процессов выпаривания и циклической кристаллизации лактозы, совмещенной с выпариванием в разработанном аппарате;
- в разработке математической модели процесса циклической кристаллизации лактозы;
- в полученных результатах изменения физико-химических свойств кристаллизата (содержание сухих веществ, степень кристаллизации лактозы, содержание влаги в кристаллизате) в процессе кристаллизации, совмещенной с выпариванием.

Анализ содержания диссертации и значимости для науки и практики полученных автором результатов

Диссертационная работа Славоросовой Е.В. состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, содержащего 160 наименований

источников отечественных и зарубежных авторов, и 7 приложений.

Диссертация изложена на 163 страницах основного текста, включает 54 рисунка и 19 таблиц.

Автором проведен анализ существующих способов удаления из сыворотки избыточной влаги, минеральных веществ и лактозы. Рассмотрены конструкции выпарных кристаллизаторов, в которых кристаллизация осуществляется преимущественно путем удаления растворителя при выпаривании. Подробно проанализированы известные способы производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки. На основе анализа состояния вопроса автором поставлены задачи исследования.

Славоросовой Е.В. проанализирована возможность использования известного барботажного кристаллизатора с воздушным охлаждением и подогревом для кристаллизации НФ-концентрата молочной сыворотки. Для этого автором проведен теоретический анализ температурных режимов работы кристаллизатора с воздушным охлаждением и подогревом и их влияния на физико-химические свойства кристаллизата. Соискателем установлено, что для осуществления интенсивного процесса выпаривания необходимо кроме воздушного теплоносителя применять дополнительный жидкостной теплоноситель.

Автором представлены результаты экспериментальных исследований процесса кристаллизации лактозы при циклических температурных режимах с воздушным и водяным охлаждением и подогревом. Показано, что процесс циклической кристаллизации более эффективно протекает, если применять циклические температурные режимы работы к предварительно сгущенному НФ-концентрату, постепенно снижая максимальное и минимальное значения температуры в каждом последующем цикле, что позволяет увеличить степень кристаллизации лактозы и средний размер кристаллов.

Соискателем разработана методика и проведен инженерный расчет кристаллизатора, который включает: расчет геометрических параметров колонки, расчет барботирующего устройства, расчет рубашки колонки и

расчет процессов теплопередачи. На основании результатов инженерного расчета спроектирован и изготовлен кристаллизатор-выпариватель.

Представлена математическая модель процесса кристаллизации в разработанном кристаллизаторе-выпаривателе, зависящая от физико-химических свойств кристаллизата, расхода и термодинамических свойств воздуха и жидкостного теплоносителя. Адекватность используемой математической модели автор оценивал путем сравнения с экспериментальными данными. На основе спроектированного кристаллизатора-выпаривателя была создана пилотная установка для выпаривания НФ-концентрата молочной сыворотки и циклической кристаллизации лактозы и проведены её испытания.

Автором проведена сравнительная оценка предлагаемой и известной линий производства частично делактозированной деминерализованной молочной сыворотки, которая показала преимущества предложенной технологии. Соискателем разработана методика оптимизации аминокислотного состава комбинированных продуктов, основанная на методах комбинаторики. Проведен сравнительный анализ затрат на энергоносители при производстве частично делактозированной деминерализованной сыворотки предложенным и известным способами, который показал, что затраты в предложенном способе значительно ниже.

В заключении сделан вывод, о возможности практического использования частично делактозированной деминерализованной сыворотки в производстве традиционных молочных продуктов для их обогащения ценными ингредиентами, содержащимися в сыворотке, что позволит предприятиям не только решить проблему утилизации сыворотки, но и получить от реализации данного продукта дополнительную прибыль.

Привлекательным является то, что разработанное соискателем оборудование и технологическая линия переработки сыворотки на пищевые цели адаптированы для предприятий с малыми объемами сыворотки, на которых применение существующего высокопроизводительного

оборудования экономически нецелесообразно.

Созданная на основе разработанного автором кристаллизатора-выпаривателя пилотная установка прошла производственные испытания и рекомендована к внедрению. Методика инженерного расчета кристаллизатора используется при разработке подобных аппаратов в машиностроении. Изготовленная установка применяется в учебном процессе при проведении лабораторных работ.

Замечания по диссертационному исследованию:

1. Стр. 43: «периодическое нагревание обеспечивает растворение мелких кристаллов, которые не поддаются механическому отделению, и интенсивный рост крупных кристаллов за счет повышения степени пересыщения кристаллизата».

Замечание: Не оценено расчетное или экспериментальное время растворения мелких кристаллов лактозы в концентрированных растворах при нагревании. Поэтому данный эффект полностью не оценен и не подтвержден.

2. Стр. 44: «Интенсивность нагревания и охлаждения колонок обеспечивается за счет большой площади соприкосновения воздуха с кристаллизатором при его барботировании».

Замечание: Как известно, энергоэффективность теплообмена от воздуха к жидкости достаточно низка, что и подтверждено расчетом коэффициентов теплопередачи (Приложение А, табл. А.1, стр. 178). А заявленная большая поверхность раздела жидкой и газообразной (пузырьковой) фаз в барботажном слое не рассчитана. Учитывая также, что барботажное перемешивание является бесконтактным и малоинтенсивным процессом, следовало оценить энергозатраты на один цикл барботажного перемешивания. Одновременно важным условием эффективного перемешивания, является равномерность распределения потока барботирующего газа по сечению колонок (реактора). Данному вопросу в работе не уделяется должное внимание. К тому же уязвимым местом

барботажного способа является быстрое загрязнение отверстий барботера и для его промышленного применения вынужденно разрабатывают различные способы и устройства для очистки.

3. Основные достоинства баромембранных процессов предопределяются низкими энергозатратами, отсутствием фазовых переходов, необходимости в нагреве, применения дополнительных реагентов. Однако недостатками этого метода являются, во-первых, малый срок эксплуатации полимерных мембранных элементов (1-3 года) и необходимость их частой замены, зависящей от условий эксплуатации установки, эффективности работы оборудования, на котором происходит подготовка сырья, поступающего на мембранную установку. Замена элементов требуется по причине необратимого снижения производительности мембран и потери селективности (способности к удержанию тех или иных соединений) элемента. Во-вторых, производительность в цикле фильтрования экспоненциально снижается, а регенерация мембран на ходу принципиально невозможна.

Замечание: В связи с предложенной автором схемой (рис. 6.2) производства делактозированной деминерализованной молочной сыворотки для количества 10 т следовало полнее оценить эффективность схемы, например, привести расчет по подбору площади фильтрования нанофильтрационной установки ТСВНФ5 и указать необходимый способ регенерации мембран.

4. Имеется замечание по технике измерений температуры на экспериментальной установке (рис. 3.1, стр. 71). Например, недостаточно корректно осуществлялись измерения температуры кристаллизата, горячего и холодного воздуха. Так, датчики 11 в лучшем случае могут показывать температуру наружной стенки кристаллизатора, а не кристаллизата, соответственно датчики 12 и 13 показывают температуру воды в термостатах. Таким образом не отражено, как в экспериментальных исследованиях процесса кристаллизации лактозы при циклических

температурных режимах осуществлялось измерение собственно температуры кристаллизата и барботирующего воздуха. Указанный в работе высокоточный термометр HI 98509 Checktemp®1 с измерительным стержневым зондом и вмонтированным в него термистором NTC, (а не термопарой, как указано в работе, стр. 72), недостаточно удобно использовать для измерения температуры кристаллизата и барботирующего воздуха.

5. Нецелесообразно было использовать спиралевидный воздуховод из полихлорвиниловой трубки с низким коэффициентом теплопроводности $\lambda=0,15$ Вт/(м·град) для подогрева/охлаждения барботируемого воздуха. Для этого лучше подходит медная трубка с $\lambda=320$ Вт/(м·град). Поэтому температура барботируемого воздуха при отсутствии эффективного теплообмена в полихлорвиниловом воздуховоде, а также при недостаточном измерении остается недостаточно определенной.

6. Вызывает сомнения и точность оценок эффектов нагревания/охлаждения сыворотки от воды путем теплопередачи через стенку кристаллизатора из трубы ПВХ, имеющей теплопроводность – 0,24 Вт/(м·град) (фото на рис. 3.2, стр. 72).

7. Расход воздуха следовало измерять газовым ротаметром, а не через измерение количества вытесненной воды.

8. Не приведены экспериментальные данные о закручивании кристаллизата внутри колонки подачей воздуха через отверстия в барботере, расположенные по касательной к внутренней стенке аппарата (рис. 4.1, стр. 96). Известно, что конструкции с тангенциальными подводами газовой фазы в аппаратах 1-й сатурации для достижения аналогичного эффекта вращения жидкости не оправдались и приводили к факельному режиму барботирования из-за недостаточной кинетической энергии газовых потоков.

9. Имеются замечания по примеру расчета изменения физико-химических параметров в процессе циклической кристаллизации на основе разработанной математической модели (Приложение Г, стр. 183).

Почему процесс смоделирован на интервале времени 0,1 мин. Не указано, что принято за время моделирования: машинное или физическое время. В пределах столь малого времени 0,1 мин практически не отражаются изменения в кристаллизате. Например, при начальной массе кристаллизата 0,155 кг из него удаляется $1,7 \cdot 10^{-8}$ м³ влаги, а содержание сухих веществ изменятся с 55 % до 55,02 %. Практически неизменными остаются и все остальные приведенные параметры. Некорректно с избыточным числом значащих цифр представлена запись температуры стенки 36,4689642°С и ряда других параметров.

Сделанные замечания не снижают положительную оценку многоплановой диссертационной работы.

Заключение

На основе анализа содержания диссертации, автореферата и опубликованных автором работ можно сделать заключение, что представленная к защите работа является самостоятельным и законченным научным исследованием, направленным на решение актуальной задачи переработки молочной сыворотки, являющейся ценным вторичным материальным ресурсом, обладающим высокой пищевой ценностью.

По области исследований, содержанию и полученным научным результатам диссертационная работа Славоросовой Елены Викторовны полностью соответствует паспорту специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств.

Считаю, что диссертационная работа Славоросовой Елены Викторовны на тему «Разработка кристаллизатора-выпаривателя для переработки НФ-концентрата молочной сыворотки» по актуальности, научной и практической значимости, объему проведенных исследований соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 № 842) предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Славоросова Елена Викторовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств (технические науки).

Официальный оппонент,
профессор кафедры «Системы автоматизированного управления»
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского
(Первый казачий университет)»
доктор технических наук, профессор

Адрес: Москва, ул. Земляной Вал, 73

Телефон: +7 (906) 064-99-91

E-mail: s.petrov@mgutm.ru

Петров Сергей Михайлович

« 29 » октября 2021

