

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛАКТОЗЫ В ПОТОКЕ

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Алексей Сергеевич Бредихин¹, канд. техн. наук, ведущий руководитель проекта

E-mail: breds24@yandex.ru

Сергей Алексеевич Бредихин², д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры процессов и аппаратов перерабатывающих производств

E-mail: sbredihin_kria@rgau-msha.ru

Роман Сергеевич Федоткин², канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры тракторов и автомобилей

E-mail: fedotkin@rgau-msha.ru

Даниил Максимович Дудин², ассистент

E-mail: d.dudin@rgau-msha.ru

Татьяна Сергеевна Кукушкина², ассистент

E-mail: t.kukushkina@rgau-msha.ru

¹ООО «OTP Проекты», г. Москва

²Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, г. Москва

В статье рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты поточной кристаллизации лактозы в сгущенной молочной подсырной сыворотке при ее охлаждении в пластинчатом скребковом кристаллизаторе непрерывного действия. На основе уравнений переноса теплоты и гидродинамики несжимаемой нелинейно-вязкой жидкости в цилиндрической системе координат разработана математическая модель процесса охлаждения сыворотки с учетом ее псевдопластических свойств и влияния радиальной скорости подачи продукта в продуктовую зону аппарата. Получено аналитическое выражение для расчета распределения температуры в межпластинном пространстве и на его основе сформирована инженерная методика определения температуры продукта на выходе из каждой теплообменной пластины и суммарной площади теплопередающей поверхности кристаллизатора. Установлены особенности формирования температурного режима массовой кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке с заданной массовой долей сухих веществ при противоточном движении продукта и хладоносителя. Экспериментально показано влияние температуры этапа охлаждения и последующего нагревания на долю лактозы, переходящей в кристаллическую фазу, а также на величину среднего размера образующихся кристаллов. Показано, что повышение температуры нагревания приводит к частичному растворению кристаллов и уменьшению их среднего размера не более чем на 35–40 %, при этом применение затравки практически не влияет на степень кристаллизации, что позволяет отказаться от ее использования в промышленных условиях. По результатам теоретических и экспериментальных исследований обоснованы рациональные режимы охлаждения сыворотки и предложена инженерная методика расчета пластинчатого скребкового кристаллизатора непрерывного действия для процессов поточной кристаллизации лактозы, обеспечивающая получение однородных по дисперсному составу кристаллов и снижение энергозатрат и металлоемкости оборудования. Разработанные подходы могут быть использованы при проектировании и модернизации линий по переработке молочной сыворотки, а также при оптимизации режимов сушки лактозосодержащих продуктов с целью повышения их качества, стабильности характеристик и расширения областей применения молочного сахара и его производных.

Ключевые слова: молочная сыворотка, температура охлаждения, массовая кристаллизация лактозы, пластинчатый скребковый кристаллизатор

Для цитирования: Кристаллизация лактозы в потоке / А. С. Бредихин, С. А. Бредихин, Р. С. Федоткин [и др.] // Молочная промышленность. 2025. № 6. С. 16–23. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2025-6-67>

ВВЕДЕНИЕ

Процесс кристаллизации лактозы представляет собой один из ключевых этапов технологической схемы переработки сгущенной и сухой молочной сыворотки, определяющий свойства и потребительское качество получаемого молочного сахара и его производных. Рост объемов промышленной переработки молочной сыворотки и расширение номенклатуры лактозосодержащих продуктов обусловливают необходимость углубленного изучения закономерностей кристаллизации лактозы и разработки энерго- и ресурсосберегающих технологий ее проведения [1, 2].

В промышленной практике кристаллизация лактозы в большинстве случаев реализуется в аппаратах периодического действия. Такой подход ограничивает степень автоматизации и оперативного управления процессом, затрудняет поддержание стабильных режимов и приводит к формированию кристаллов с неоднородным дисперсным составом. Переход к аппаратам непрерывного действия открывает возможность существенно повысить управляемость процесса, расширить диапазон регулируемых параметров и устранить значительную часть указанных недостатков [2, 3].

Поточная кристаллизация лактозы в сгущенной молочной сыворотке протекает в сложных гидродинамических условиях и при значительном разбросе температур, что требует специального конструкторско-технологического подхода.

Использование аппаратов непрерывного действия позволяет снизить удельные энергозатраты, сократить производственные площади и металлоемкость оборудования, а также получить более однородные по размеру кристаллы, средний диаметр которых, по экспериментальным данным, в 3–4 раза меньше, чем при периодической кристаллизации. Выполненные в данной работе исследования проведены при участии д-ра техн. наук, профессора В. В. Червецова, на протяжении длительного времени занимающегося фундаментальными и прикладными аспектами поточной кристаллизации лактозы из молочной сыворотки [4–6].

Целью работы является изучение процесса кристаллизации лактозы в пластинчатом скребковом кристаллизаторе непрерывного действия с опорой на кинетический анализ температурных изменений сгущенной молочной сыворотки.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования являлись молочная подсырная сыворотка, сгущенная до 55 % сухих веществ; модельный раствор, приготовленный

из восстановленной сухой подсырной сыворотки с массовой долей сухих веществ 50–60 % и начальной температурой 60–65 °C. Указанные пределы концентрации и температурные параметры модельного раствора устанавливали в соответствии с технологическим регламентом производства сухой молочной подсырной сыворотки.

При исследовании кристаллизации лактозы в молочной сыворотке последняя рассматривается как истинный раствор, представляющий собой термодинамическую устойчивую гомогенную (однородную) систему. Основным условием для зарождения кристаллов является пересыщение раствора. Чем оно выше, тем более мелкие кристаллы образуются в нем. Пересыщенный раствор может быть получен повышением его концентрации или охлаждением. Известно, что при снижении температуры растворы становятся сначала насыщенными, а при дальнейшем охлаждении – концентрационно неравновесными (пересыщенными). При переходе раствора из пересыщенного состояния в насыщенное происходит процесс кристаллизации (выпадение кристаллов) [1, 7–10].

Исследования закономерностей теплообмена при кристаллизации лактозы молочной сыворотки проводили на экспериментальной установке (рис. 1), разработанной на базе пластинчатого скребкового кристаллизатора непрерывного действия.

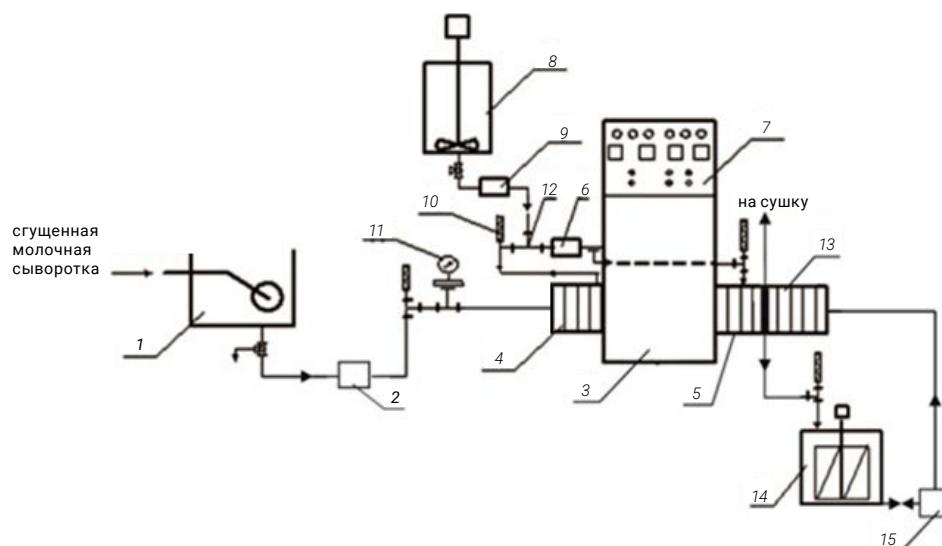


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки: 1 – приемный бак; 2 – насос подачи молочной сгущенной сыворотки; 3 – пластинчатый скребковый кристаллизатор; 4 – I секция охлаждения; 5 – II секция охлаждения; 6 – роторно-пульсационный аппарат (РПА); 7 – щит управления; 8 – емкость для затравки; 9 – насос-дозатор; 10 – термометры сопротивления; 11 – манометр с разделительной мембраной; 12 – струйный смеситель; 13 – секция нагрева; 14 – буферная емкость; 15 – насос подачи продукта на сушку

Теплопередающая поверхность пластинчатого скребкового кристаллизатора непрерывного действия формируется набором унифицированных теплообменных модулей. Каждый модуль (рис. 2, 3) представляет собой секцию, собранную из чередующихся теплообменных и продуктовых дисков, смонтированных на опорных штангах и зафиксированных в общий пакет. В совокупности последовательно установленные пластины (рис. 2) образуют единую поверхность теплопередачи аппарата, обеспечивающую либо подвод, либо отвод тепла от перерабатываемого продукта в соответствии с выбранным технологическим режимом (рис. 3).

В полостях продуктовых пластин размещены подвижные диски, жестко закрепленные на приводном валу. На обеих сторонах каждого диска смонтированы полиамидные скребковые элементы (ножи), имеющие возможность упругого контакта с поверхностью соседних теплообменных пластин. При вращении дисков скребки осуществляют одновременное перемешивание слоя сыворотки и регулярное удаление пристенного ламинарного слоя, что обеспечивает обновление пограничного слоя, интенсификацию теплообмена и предотвращение образования устойчивых отложений кристаллизующейся лактозы. В зависимости от схемы организации процесса сгущенная молочная сыворотка подается в междисковое пространство либо через центральное распределительное отверстие, либо через периферийные каналы, что позволяет варьировать гидродинамику потока и распределение времени пребывания продукта в рабочем объеме.



Рисунок 2. Общий вид пластин: 1 – пластина с центральной подачей продукта; 2 – пластина с периферийной подачей продукта

Течение теплообменяющих сред (сгущенной молочной сыворотки и хладоносителя) в аппарате (рис. 4) было организовано противоточным, что позволяло обеспечивать постоянство движущей силы охлаждения сыворотки [1, 6].

В качестве теплоносителя в секции нагрева аппарата использовали циркулирующую воду, подогретую до температуры 60 ± 2 °C, обеспечивающую быстрый и контролируемый подъем температуры продукта. Для охлаждающего контура в кристаллизационной зоне применяли хладоноситель – ледяную воду с регулируемым интервалом температур 2–8 °C, что позволяло формировать заданный температурный градиент между продуктовой и теплоносительной средами.

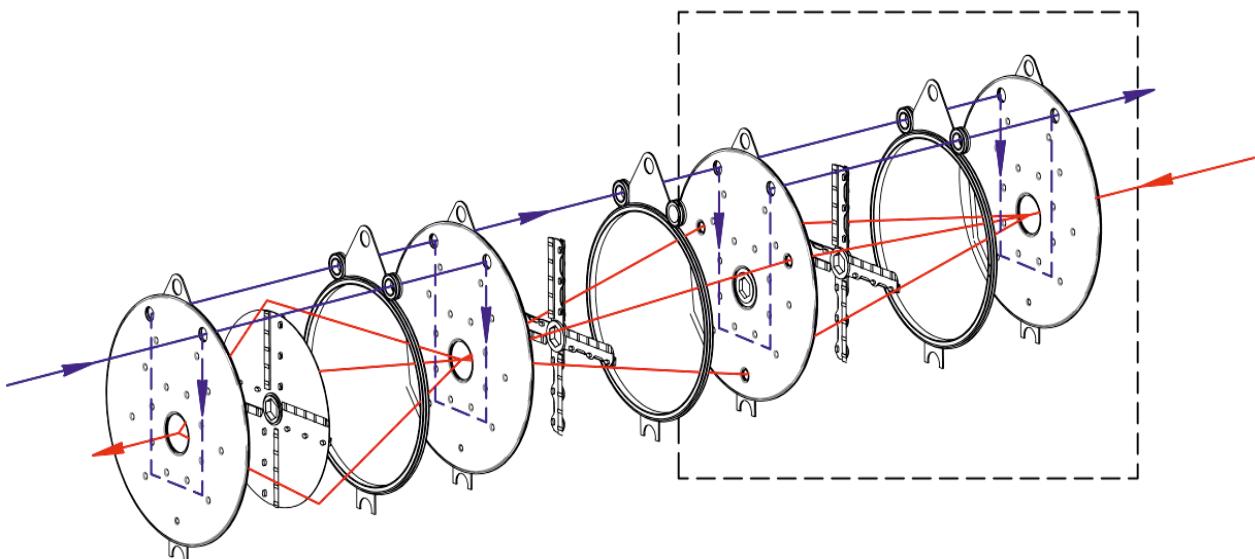


Рисунок 3. Схема течения сгущенной молочной сыворотки и хладоносителя в теплообменной пластине (стрелками показано движение сред: синяя – вход и выход продукта соответственно; красная – вход и выход тепло-хладоносителя соответственно)

При построении математической модели приняли следующие идеализирующие допущения:

- тепломассообмен анализировали на примере одной условной теплообменной пластины, считая ее репрезентативной для всего пакета;
- объем продукта в межпластинчатом канале рассматривали в виде цилиндрического слоя малой толщины (диска) с постоянной высотой;
- сгущенную молочную сыворотку описывали как псевдопластическую несжимаемую жидкость, а ее реологическое поведение при охлаждении характеризовали в рамках степенного закона течения (уравнение Оствальда-де Виля);
- движение продукта внутри канала считали ламинарным, неизотермическим, при постоянном массовом расходе, без разрывов сплошности потока и без проскальзывания у стенки;
- распределение температуры в поперечном сечении продуктового слоя полагали равномерным (модель «идеального поршневого потока»), а влияние способа подвода продукта (периферийная либо центральная подача) на мгновенное значение температуры в зоне теплообмена – пренебрежимо малым.

Для экспериментальной части исследования применяли унифицированные, аттестованные и стандартизованные методики химико-технологического и микробиологического анализа молочных продуктов, регламентированные действующими нормативными документами и изложенные в специализированной научно-технической литературе.

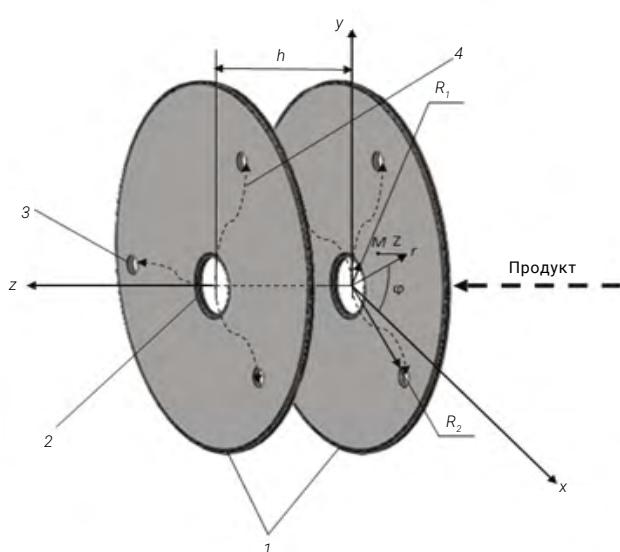


Рисунок 4. Расчетная схема: 1 – продуктовые пластины; 2 – центральное отверстие; 3 – периферийные отверстия; 4 – линии тока продукта



Источник изображения: freepik.com

мативными документами и изложенные в специализированной научно-технической литературе.

Для обработки результатов экспериментальных исследований использовались методы математической статистики [11]. Для статистического анализа использовали подходы регрессионного моделирования, реализованные в программных средах Microsoft Excel, MathCad, MatLab и Микро-Анализ Pro.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение распределения температуры сгущенной молочной сыворотки в теплообменной пластине проведено с помощью дифференциального уравнения переноса теплоты в движущихся жидкостях средах, записанных в цилиндрической системе координат при осесимметричном распределении температуры в сыворотке с учетом

ее вязкостных свойств, без учета диссипации энергии для кристаллизации в ней лактозы [12–14]:

$$\nu_r + \frac{\partial T}{\partial r} + \nu_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

где T – температура в точках продукта, °C; r и z – цилиндрические координаты точки продукта, ν_r и ν_z – проекции скорости точек продукта на оси r и z , a – коэффициент температуропроводности.

С учетом того, что канал протекания продукта (рис. 4) обладает сложной пространственной конфигурацией, при проведении аналитического расчета была введена система дополнительных идеализирующих допущений, не приводящих к существенному искажению реальной гидродинамической картины. Принято, что осевая составляющая скорости потока продукта ν_z значительно меньше радиальной ν_r и окружной ν_ϕ , в связи с чем в уравнении (1) аксиальную скорость полагают равной нулю

$$\nu_z \frac{\partial T}{\partial z} \approx 0$$

и ею пренебрегают при последующем анализе.

Источник изображения: freepik.com



Для определения радиального распределения скорости воспользовались дифференциальным уравнением стационарного осесимметричного течения несжимаемой нелинейно-вязкой жидкости. При этом реологические константы, характеризующие псевдопластическое поведение сгущенной молочной сыворотки, а также ее плотность ρ для рассматриваемой теплообменной пластины принимались постоянными и не зависящими от температуры. Указанное допущение позволяет существенно упростить математическую модель, получить аналитическое выражение для профиля радиальной скорости и в дальнейшем использовать его при расчете сопряженных процессов теплообмена и кристаллизации лактозы в потоке.

Для этого общее дифференциальное уравнение осесимметричного стационарного течения сплошной среды запишем в напряжениях [11] в проекции на радиальное направление:

$$\nu_r + \frac{\partial \nu_r}{\partial r} + \nu_z \frac{\partial \nu_r}{\partial z} - \frac{\nu_\phi^2}{r} = F_r + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\tau_{rr} - \tau_{\phi\phi}}{r} \right\} \quad (2)$$

где τ_{rr} , $\tau_{\phi\phi}$ – нормальные напряжения на площадках перпендикулярных соответственно радиальной r и окружной ϕ осям, τ_{rz} – касательное напряжение на площадках перпендикулярных осям r и z .

Решение уравнения (2) позволило получить выражение для расчета температуры охлаждения сгущенной молочной сыворотке при кристаллизации в ней лактозы, как при центральном способе ее подачи, так и при периферийном способе подачи в продуктовую зону. Решение имеет вид:

$$T(r, z) = -\frac{\pi}{B^2 h^2} \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ j [T_1 - T_3 - (T_1 - T_4) \cos j \pi] \left[r^2 - R_1^2 - \frac{j^2 \pi^2}{2Bh^2} (r^4 - R_1^4) - \frac{2B^2 h^2}{j^2 \pi^2} \right] \times e^{\frac{j^2 \pi^2}{2Bh^2} (R_1^2 - r^2)} \sin \frac{j \pi}{h} z \right\} + T_3 - \frac{z}{h} (T_3 - T_4) \quad (3)$$

На основании результатов аналитического моделирования была сформирована программа экспериментальных исследований, направленных на количественную оценку влияния температуры как на процессы образования кристаллов лактозы в сгущенной молочной сыворотке, так и на их последующую растворимость. В рамках эксперимента анализировали температурные изменения как фактор, определяющий степень перехода лактозы в кристаллическую фазу, а также их влияние на средний линейный размер образовавшихся кристаллов.

На основе зависимости (4) рассчитывали массовую долю лактозы в начальной и конечной жид-

ких фазах. Далее по разности значений массовых долей лактозы в растворе до и после проведения процесса определяли количество вещества, выбывшее из раствора за счет кристаллизации:

$$\text{Вых.прод.} = \frac{100 \times (M_{\text{нач}} - M_{\text{кон}})}{100 - M_{\text{кон}}} \quad (4)$$

где $M_{\text{нач}}$ – начальная массовая доля лактозы в растворе, %; $M_{\text{кон}}$ – конечная массовая доля лактозы в растворе, %.

Зависимость количества лактозы, переведенной в кристаллическое состояние, от массовой доли сухих веществ в сгущенной молочной сыворотке представлена на рисунке 5. Для оценки влияния стадии последующего нагревания на степень кристаллизации лактозы предварительно полученную кристаллическую суспензию сыворотки подвергали нагреву до температуры 60 °C.

Серии опытов проводили в двух режимах: с предварительным внесением кристаллизационной затравки и без ее использования [9, 10]. Как следует из зависимостей, представленных на рисунке 5, при

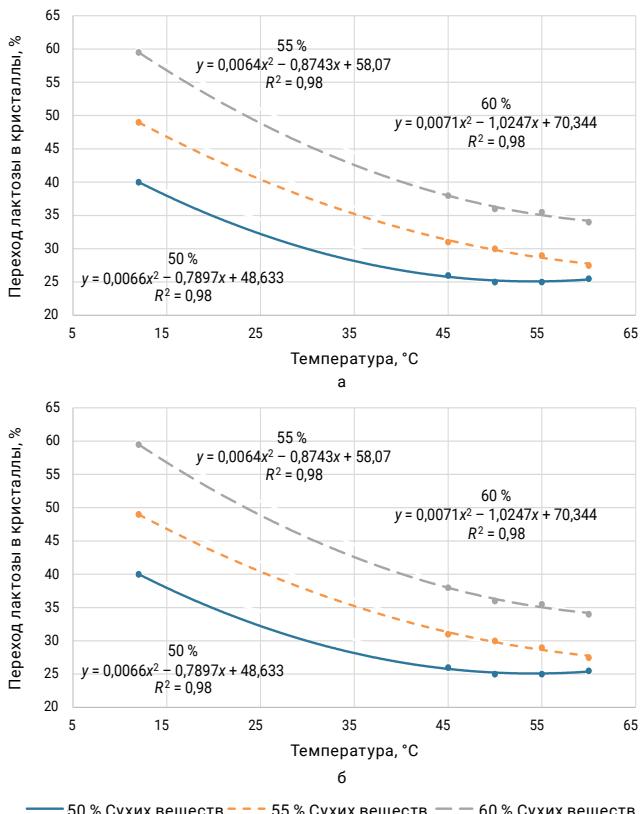


Рисунок 5. Зависимость количества лактозы, перешедшей в кристаллическое состояние от температуры сгущенной молочной сыворотки с различной массовой долей сухих веществ:
а) без затравки; б) с затравкой

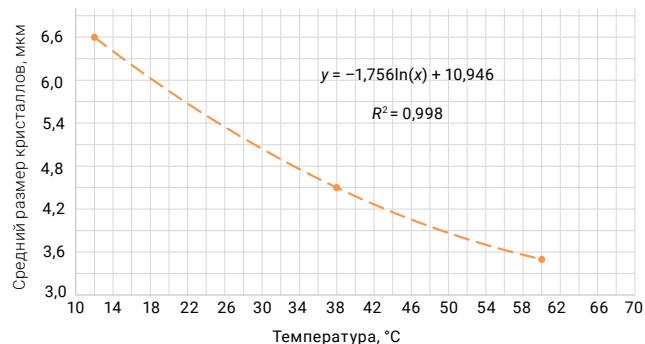


Рисунок 6. Зависимость среднего размера кристаллов от температуры нагревания сгущенной молочной сыворотки с массовой долей сухих веществ 60 %

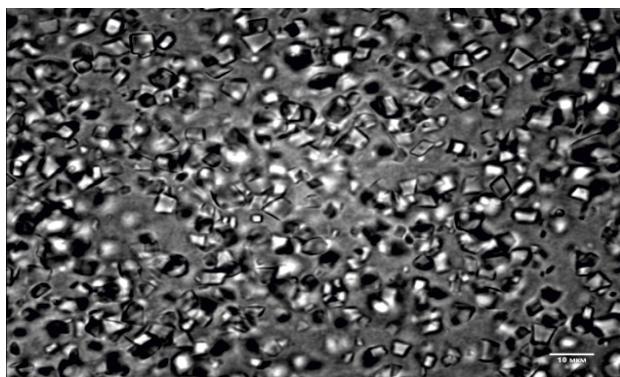
росте температуры фиксируется заметное снижение количества лактозы, находящейся в твердой (кристаллической) форме. Такая закономерность обусловлена интенсификацией процессов растворения кристаллов при нагревании и термодинамически выгодным смещением фазового равновесия системы в сторону жидкой фазы [7].

В ходе анализа кривых для опытов с затравкой и без нее можно сделать вывод о нецелесообразности использования затравки при кристаллизации лактозы в рассматриваемых условиях, что упрощает технологическую схему и снижает затраты при промышленной реализации процесса.

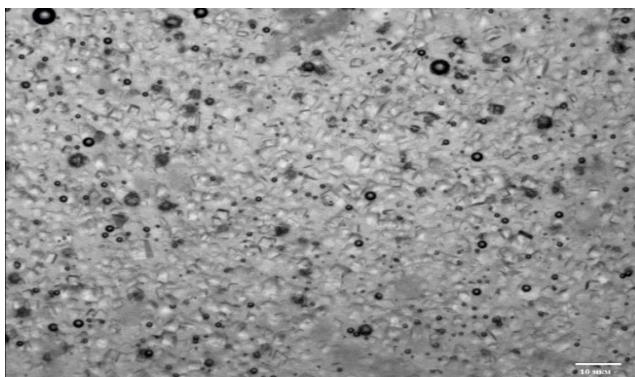
В ходе проведенного эксперимента реализовали два альтернативных подхода к предварительной кристаллизации лактозы в сгущенной молочной сыворотке. В первом случае продукт после кристаллизации охлаждали до 37–38 °C и в условиях непрерывного потока сразу направляли на распылительную сушку. Во втором случае сгущенную сыворотку охлаждали в пластинчатом скребковом теплообменнике до 12 °C, затем аккумулировали в буферной емкости и подавали в третью секцию нагревания, где температуру повышали до 50–60 °C, после чего продукт также поступал на стадию сушки.

На рисунке 6 представлена зависимость среднего размера кристаллов лактозы от температуры нагревания. Полученные данные показывают, что при увеличении температуры средний размер кристаллов заметно снижается.

При увеличении температуры нагревания происходит уменьшение размеров кристаллов не более чем на 35–40 %. Это наглядно показывают фотографии изменения размеров кристаллов в зависимости от температуры нагревания: при 12 °C (рис. 7а) и 60 °C (рис. 7б).



а



б

Рисунок 7. Фотографии изменения размеров кристаллов в зависимости от температуры нагревания: а) при 12 °C; б) при 60 °C

На основе полученных данных о механизмах кристаллизации лактозы в динамических условиях была разработана инженерная методология проектирования пластиначатого скребкового кристаллизатора производительного типа. Ключевым параметром инженерного расчета является определение требуемой величины теплообменной поверхности аппарата, которая вычисляется как произведение площади одиночной пластины на их общее количество в составе аппарата.

Для предварительного определения теплового состояния сгущенной молочной сыворотки после прохождения каждого каскада необходимо произвести расчет температурных профилей на поверхностях дисковых элементов с последующим определением температуры теплоносителя. Процедура расчета количества теплообменных элементов считается завершенной в момент достижения заданного температурного уровня на выходной линии. Последовательный ряд соединенных пластин формирует требуемую теплопередающую поверхность, обеспечивающую охлаждение сгущенной молочной сыворотки до температурной точки начала массовой кристаллизации лактозы.

При проектировании многопластиначатого скребкового кристаллизатора с последовательной схемой подключения теплообменных элементов необходимо установить величину гидродинамического сопротивления (или объемный расход) и температурный диапазон сгущенной молочной сыворотки на входе и выходе аппарата. На основе этих исходных параметров осуществляется выбор конструктивных и геометрических характеристик теплообменных пластин, а также их количественное определение. При этом допускается предположение об идентичности геометрических параметров всех теплообменных элементов в составе аппарата.

Анализ выполненных теоретических исследований указывает на то, что тепловые процессы в каждом теплообменном элементе протекают с идентичной интенсивностью независимо от конфигурации подачи сгущенной молочной сыворотки (осевое или радиальное направление). Указанное положение подтверждается результатами численного моделирования связанной системы уравнений гидродинамики и тепловой энергии (соотношения (1), (2)), которые сохраняют свое математическое описание для каждого теплообменного элемента в системе.

ВЫВОДЫ

На основе уравнений гидродинамики и переноса теплоты получена расчетная зависимость изменения температуры сгущенной молочной сыворотки в теплообменной пластине пластиначатого скребкового кристаллизатора с учетом свойств продукта и радиальной скорости его движения, что позволило описать температурное поле при центральной и периферийной подаче продукта.

Показано, что при массовой доле сухих веществ 55–60 % и противоточном движении сыворотки и хладоносителя реализуется режим массовой кристаллизации лактозы с образованием однородных по дисперсному составу кристаллов, размер которых в 3–4 раза меньше, чем при кристаллизации в аппаратах периодического действия.

Экспериментально установлено влияние температуры охлаждения и последующего нагревания на количество лактозы, переходящей в кристаллическое состояние, и средний размер кристаллов: при нагревании выше 37–38 °C степень кристаллизации снижается, а уменьшение среднего размера кристаллов достигает 35–40 % за счет их частичного растворения.

В результате проведенного исследования доказано, что предварительное внесение кристаллизованной затравки в сгущенную молочную сыворотку практически не влияет на выход и размер кристаллов, что позволяет отказаться от ее использования и упростить промышленную технологическую схему без ухудшения гранулометрических характеристик продукта.

Разработана инженерная методика расчета площади теплопередающей поверхности и числа теплообменных пластин кристаллизатора непрерывного действия, обеспечивающая задание требуемого температурного профиля по каскадам и пригодная для проектирования и модернизации линий переработки сыворотки с уменьшением металлоемкости и энергозатрат. ■

Поступила в редакцию: 10.06.2025
Принята в печать: 20.11.2025

IN-FLUX CRYSTALLIZATION OF LACTOSE

Alexey S. Bredikhin¹, Sergey A. Bredikhin², Roman S. Fedotkin², Daniil M. Dudin², Tatyana S. Kukushkina²

¹ OTR Projects, Moscow

² Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow

ORIGINAL ARTICLE

Lactose can be crystallized in condensed whey during cooling in a continuous plate-and-scraper crystallizer. In this study, the mathematical model of whey cooling relied on the heat transfer equations and the hydrodynamics of incompressible nonlinear viscous fluid in a cylindrical coordinate system. It took into account the pseudoplastic properties and the radial velocity of the feed. Based on the precalculated temperature distribution in the interplate area, the authors developed a new engineering methodology for determining the product temperature at the outlet of each heat exchange plate, as well as the total area of the heat-transfer surface. The research made it possible to identify the optimal temperature mode for the mass crystallization of lactose in condensed whey at a given solids mass fraction during countercurrent feed of the product and the coolant. The share of crystallized lactose and the average crystal size depended on the temperature during cooling and heating. Higher temperatures dissolved crystals and reduced their average size by 35–40%. The seeding stage had no effect on the crystallization degree and could be eliminated from industrial settings. The theoretical and experimental studies resulted in rational whey cooling modes and a new engineering methodology for a continuous plate-and-scraper crystallizer with in-flux lactose crystallization. It provided uniform crystals at lower energy costs and equipment deterioration. Expanding the industrial range of milk sugar and its derivatives, the new approach may update whey processing lines and improve the drying modes for lactose-containing products.

Keywords: whey, cooling temperature, mass crystallization of lactose, plate scraper crystallizer

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бредихин, С. А.** Процессы и аппараты пищевой технологии / С. А. Бредихин [и др.]. – СПб.: Издательство Лань, 2025. – 544 с.
2. **Бредихин, С. А.** Технологическое оборудование переработки молока / С. А. Бредихин [и др.]. – СПб.: Издательство Лань, 2025. – 412 с.
3. **Гнездилова, А. И.** Теоретические и практические аспекты процесса кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара / А. И. Гнездилова [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. 2023. № 2(50). С. 128–140. https://doi.org/10.52231/2225-4269_2023_2_128; <https://elibrary.ru/ioutfq>
4. **Ding, Z.** Heat and mass transfer of scraped surface heat exchanger used for suspension freeze concentration / Z. Ding [et al.] // Journal of Food Engineering. 2021. Vol. 288. 110141. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110141>
5. **Filla, J. M.** Assessing whey protein sources, dispersion preparation method and enrichment of thermomechanically stabilized whey protein pectin complexes for technical scale production / J. M. Filla [et al.] // Foods. 2021. Vol. 10(4). 715. <https://doi.org/10.3390/foods10040715>
6. **Solano, J. P.** Enhanced thermal-hydraulic performance in tubes of reciprocating scraped surface heat exchangers / J. P. Solano [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 220. 119667. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119667>
7. **Барковская, И. А.** Полисахарид-контролируемая кристаллизация лактозы в сгущенном молоке с сахаром / И. А. Барковская [и др.] // Пищевая Метайнженерия. 2023. Т. 1, № 4. С. 11–27. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.4.25>
8. **Шохалов, В. А.** Совершенствование процесса кристаллизации лактозы в производстве молочного сахара / В. А. Шохалов, А. И. Гнездилова, В. Н. Шохалова // Молочная промышленность. 2024. № 2. С. 48–52. <https://doi.org/10.21603/1019-8946-2024-2-7>; <https://elibrary.ru/ubotvq>
9. **Шохалов, В. А.** Скорость кристаллизации лактозы в производствемолочного сахара / В. А. Шохалов, А. И. Гнездилова, В. Н. Шохалова // Ползуновский вестник. 2025. № 3. С. 39–44. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.006>; <https://elibrary.ru/ljhamn>
10. **Evdokimov, I. A.** Comparative study of the granulometric composition of seed materials used during the lactose crystallization / I. A. Evdokimov [et al.] // Modern Science and Innovations. 2025. Vol. 1(49). Р. 82–89. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2025.1.7>; <https://elibrary.ru/pbvejm>
11. **Горелов, А. С.** Методологические основы автоматизированного статистического контроля качества продукции / А. С. Горелов, В. Б. Морозов, Е. А. Саввина. – Тула: Тульский государственный университет, 2020. – 332 с.
12. **Gombár, M.** Optimization methods in mathematical modeling of technological processes / M. Gombár. – Cham: Springer, 2023. – 170 р.
13. **Бурак, Л. Ч.** Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав / Л. Ч. Бурак // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 3. С. 59–73. <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-59-73>; <https://elibrary.ru/wqktrw>
14. **Бредихин, А. С.** Метод инженерного расчёта пластинчатого скребкового теплообменника / А. С. Бредихин, С. А. Бредихин // Современные достижения биотехнологии. Техника, технологии и упаковка для реализации инновационных проектов на предприятиях пищевой и биотехнологической промышленности: Материалы VII Международной научно-практической конференции. – Ставрополь-Пятигорск: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. – С. 62–66. <https://elibrary.ru/prcrgjk>