

# Полисахарид-контролируемая кристаллизация лактозы в сгущенном молоке с сахаром

И. А. Барковская, А. Г. Кручинин, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова, Е. И. Большакова

Всероссийский  
научно-исследовательский  
институт молочной  
промышленности, г. Москва,  
Российская Федерация

## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Одной из основных проблем при хранении сгущенного молока с сахаром является процесс образования органолептически ощутимых кристаллов лактозы более 10 мкм. Для предотвращения этого порока применяется технология внесения мелкокристаллической лактозной затравки, обеспечивающая получение качественного продукта. Однако, традиционная технология энергозатратна, требует больших производственных площадей и металлоёмкого оборудования в виде вакуум-кристаллизаторов. В этой связи остаются актуальными исследования альтернативных подходов, препятствующих спонтанной кристаллизации лактозы при производстве сгущенного молока с сахаром

**Цель:** Целью данного исследования является создание композиции полисахаридов для предотвращения формирования органолептически ощутимых кристаллов лактозы в сгущенном молоке с сахаром

**Материалы и методы:** В качестве материалов для выработки концентрированных молочных модельных систем с сахаром применяли коммерческие образцы сухого обезжиренного молока, сахара, полисахаридов и сухого гидролизата сывороточных белков. В исследовании использовали методы ротационной вискозиметрии, электронной микроскопии и метод сорбционно-емкостного определения связанной воды для измерения показателей динамической вязкости, линейных размеров кристаллов лактозы, показателей активности воды, соответственно

**Результаты:** В статье представлены данные о влиянии отдельных полисахаридов, а также их комплексов на процесс кристаллизации лактозы в концентрированных молочных системах с сахаром о формировании устойчивой структуры матриц, отражающие способность оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие гидроколлоидов на процесс кристаллизации лактозы и изменения динамической вязкости. Для многокомпонентных комплексных систем, содержащих карбоксиметилцеллюлозу, альгинат натрия, камедь тары, камедь рожкового дерева и гуммиарабик, установлен как эффект синергизма, заключающийся в межмолекулярном взаимодействии полисахаридов и замедлении спонтанной кристаллизации лактозы, так и эффект антагонизма, проявляющийся в увеличении размеров кристаллов

**Выводы:** Композиция, содержащая камедь тары, карбоксиметилцеллюлозу и гуммиарабик, показала наиболее ярко выраженные свойства к ингибированию роста кристаллов лактозы, а также высокие тиксотропные свойства. В практическом аспекте применение данной комплексной добавки для производства сгущенных молочных продуктов с сахаром методом восстановления сухих компонент может заменить классический процесс внесения затравки мелкокристаллической лактозы, а, соответственно, снизить энерго- и металлоемкость процесса кристаллизации лактозы в продукте.

**Ключевые слова:** полисахариды; кристаллизация лактозы; динамическая вязкость; сгущенные молочные консервы с сахаром; стабилизирующие добавки

## Корреспонденция:

Александр Геннадьевич  
Кручинин,

E-mail: a\_kruchinin@vniimi.org

## Конфликт интересов:

авторы сообщают  
об отсутствии конфликта  
интересов.

**Поступила:** 12.03.2023

**Принята:** 15.12.2023

**Опубликована:** 30.12.2023

**Copyright:** © 2023 Авторы



Для цитирования: Барковская, И.А., Кручинин, А.Г., Туровская, С.Н., Илларионова, Е.Е., & Большакова, Е.И. (2023). Полисахарид-контролируемая кристаллизация лактозы в сгущенном молоке с сахаром. *FOOD METAENGINEERING*, 1(4), 11-287 <https://doi.org/10.37442/fme.2023.4.25>

# Polysaccharide-Controlled Lactose Crystallization in Sweetened Condensed Milk

Irina A. Barkovskaya, Alexander G. Kruchinin, Svetlana N. Turovskaya, Elena E. Illarionova, Ekaterina I. Bolshakova

All-Russian Dairy Research Institute,  
Moscow, Russian Federation

## ABSTRACT

**Introduction:** One of the main issues during the storage of sweetened condensed milk is the formation of lactose crystals larger than 10  $\mu\text{m}$ , which are organoleptically perceivable. The traditional method of preventing this defect involves adding finely crystalline lactose seed, ensuring the production of a quality product. However, this conventional process is energy-intensive, requiring significant production space and metal-intensive equipment, such as vacuum crystallizers. Therefore, research into alternative approaches to prevent spontaneous lactose crystallization during the production of sweetened condensed milk remains relevant.

**Purpose:** The aim of this study is to create a polysaccharide composition to prevent the formation of organoleptically perceivable lactose crystals in sweetened condensed milk.

**Materials and Methods:** Commercial samples of dry skimmed milk, sugar, polysaccharides, and dry hydrolysate of whey proteins were used as materials for developing concentrated dairy model systems with sugar. The study employed rotational viscometry, electron microscopy, and sorption-capacity measurement of bound water to determine dynamic viscosity, linear dimensions of lactose crystals, and water activity indices, respectively.

**Results:** The article presents data on the influence of individual polysaccharides and their complexes on lactose crystallization in concentrated dairy systems with sugar and the formation of stable matrix structures. The results reflect the ability of hydrocolloids to positively and negatively impact lactose crystallization and changes in dynamic viscosity. For multi-component complex systems containing carboxymethylcellulose, sodium alginate, tara gum, locust bean gum, and gum arabic, both synergistic effects (intermolecular interactions of polysaccharides slowing down spontaneous lactose crystallization) and antagonistic effects (increased crystal size) were established.

**Conclusion:** A composition containing tara gum, carboxymethylcellulose, and gum arabic showed the most pronounced properties in inhibiting lactose crystal growth and high thixotropic properties. Practically, the use of this complex additive in the production of sweetened condensed dairy products by restoring dry components can replace the classic process of adding fine-crystalline lactose seed, thus reducing the energy and metal intensity of lactose crystallization in the product.

**Keywords:** polysaccharides; lactose crystallization; dynamic viscosity; sweetened condensed milk; stabilizing additives

## Correspondence:

Alexander G. Kruchinin,  
E-mail: a\_kruchinin@vnimi.org

## Conflict of interest:

The authors report the absence of a conflict of interest.

**Received:** 12.03.2023

**Accepted:** 15.12.2023

**Published:** 30.12.2023

**Copyright:** © 2023 The Authors



**To cite:** Barkovskaya, I.A., Kruchinin, A.G., Turovskaya, S.N., Illarionova, E.E., & Bolshakova, E.I. (2023). Polysaccharide-controlled crystallization of lactose in sweetened condensed milk. *FOOD METAENGINEERING*, 1(4), 11-27. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.4.25>

## **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальным вопросом пищевой промышленности остается повышение качества и безопасности продуктов переработки молока. Проблема повышения качества продукции также в полной мере относится к производству одного из видов молочных консервов — сгущенного молока с сахаром, пользующегося популярностью не только у населения, благодаря стабильности его микробиологических, физико-химических и органолептических показателей, высокой пищевой ценности, удобству использования, но и массовой востребованностью в качестве сырья для промышленной переработки в кондитерской, хлебопекарной и прочих отраслях (Радаева, 2020). Основной проблемой при хранении сгущенного молока с сахаром является процесс образования органолептически ощутимых кристаллов лактозы более 10 мкм. Формирование кристаллов, характеризующихся большими линейными размерами, оказывает существенное влияние на консистенцию готового продукта.

При производстве сгущенного молока с сахаром наиболее распространенной является технология, предусматривающая внесение мелкокристаллической лактозной затравки, размер кристаллов которой не должен превышать 3–4 мкм, обеспечивающая образование максимального количества центров кристаллизации (Радаева, 1986). Внесение затравки на заключительном этапе технологического процесса, при условии соблюдения температурно-временных режимов производства, позволяет получить кристаллы с размером не более 10 мкм и концентрацией в 1 мл продукта не менее 400 тысяч (Туровская, 2018). Несмотря на формирование органолептически не ощутимых кристаллов лактозы, данная технология характеризуется значительными энергозатратами, требует больших производственных помещений и дорогостоящего оборудования (вакуум-кристаллизаторы).

Существует технология, исключающая использование затравки из мелкокристаллической лактозы. В этом случае применяют ферментный препарат  $\beta$ -галактозидаз, гидролизующий дисахарид лактозу на моносахариды глюкозу и галактозу, которые обладают более высокой степенью растворимости, в результате чего предотвращается формирование кристаллов сахаров, следовательно, снижается риск возникновения пороков консистенции сгущенного молока с сахаром (Фатьянов, 2011).

Недостатками описанной технологии являются ее экономические показатели, аналогичные технологии с внесением затравочного материала, а также увеличивающаяся склонность готового продукта к реакции Майяра, ввиду повышенного содержания моносахаров (Галстян, 2012). В связи с этим, актуализируются исследования, направленные на изучение альтернативных способов контроля спонтанной кристаллизации лактозы при производстве сладких молочных консервов.

Исследование влияния различных веществ и ингредиентов на регулирование процесса кристаллизации лактозы, а также разработки технологического оборудования для интенсификации этапа кристаллообразования при производстве сладких сгущенных продуктов последние десять лет включены в сферу интересов ученых отрасли. Так, Червецов (2011) представил схему установки для двухступенчатого способа охлаждения сгущенного молока с сахаром, позволяющая уменьшить линейные размеры кристаллов лактозы на 18–25 %, а также сократить продолжительность процесса на 65 %. Виноградова (2018) продемонстрировала положительное влияние на процесс кристаллизации лактозы подсырной сыворотки, обеспечивающей получение качества молочных консервов с сахаром, соответствующего нормативной документации на продукты данной группы. Рябова (2014) описала технология сгущенных молочных продуктов с сахаром с проведением процесса направленной гетерогенной кристаллизации лактозы. Автор исследовала влияние семи имитационных материалов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaSO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ) на процесс формирования кристаллов лактозы. Производственная апробация и хранение продукции в течение 8 месяцев подтвердили эффективность технологии гетерогенной кристаллизации с применением первых трех имитационных зародышевых центров (Рябова, 2014). Согласно Гнездиловой с соавторами (2014), необходимая консистенция сгущенных молочных консервов с сахаром достигается также посредством изменения реологических характеристик продукта. Указанная исследовательская группа трансформировала углеводно-белковый состав и применяли различные режимы охлаждения. В качестве нетрадиционных компонентов в рецептуру исследуемых систем были включены крахмальных сироп, солод и деминерализованная сухая сыворотка. Полученные данные свидетельствуют о положительном влиянии вносимых компонентов на структурные характеристики готового продукта (увеличение вязкости, прочности, уменьшение разме-

ра кристаллов лактозы), объясняемом формированием связей между мицеллами казеина с участием глюкозы (Гнездилова, 2014; Smykov, 2019). Вышеприведенные технологии тем не менее требуют проведения этапа кристаллизации.

Необходимых микроструктурных характеристик готовой продукции можно также достичь при использовании стабилизирующих добавок, в основном полисахаридов (гидроколлоидов), которые на данный момент применяют в производстве молочкосодержащих консервов, вырабатываемых нетрадиционным способом — методом восстановления сухих компонентов, т.е. без использования вакуум-выпарных аппаратов (Писарева, 2016). Широко используемыми в молочной промышленности полисахаридами являются пектины, каррагинаны, альгинаты, растительные камеди и камеди микробного происхождения, производные целлюлозы, благодаря их функционально-технологическим свойствам (Sajad Pirs, 2023). В ряде работ российских и зарубежных авторов (Das, 2013; Sánchez-García, 2021; Писарева (2016) и др.) сообщается об использовании стабилизаторов не только для достижения заданных реологических показателей, но и для контроля процесса кристаллизации лактозы. Так, Das (2013) на примере модельных растворов, содержащих гуммиарабик и лактозу в соотношении 10:90 соответственно, продемонстрировал эффект сдерживания роста кристаллов молочного сахара в результате добавления растительного полисахарида. Аналогичное исследование проведено Sánchez-García (2021), указавшим на способность каппа- и йота-каррагинана влиять на процесс кристаллизации молочного сахара в водных системах, изменяя продолжительность мутаротации. Portnoy (2021) отметила использование камедей микробного происхождения, в том числе ксантановой камеди, для предотвращения порока консистенции сгущенного молока с сахаром «песчанистость». Писарева (2016) обосновала возможность использования анионных полисахаридов (низкоэтерифицированного пектина и альгината натрия) в технологии сладких молочных консервов для контроля показателей консистенции продукта, обеспечения высоких органолептических характеристик и предотвращения формирования крупных кристаллов лактозы. Известно также использование камеди тары и карбоксиметилцеллюлозы в технологии молочкосодержащих продуктов с промежуточной влажностью с целью совершенствования качественных характеристик готового продукта, в том числе его консистенции

(Косова, 2010). Голубева (2020) с соавторами сообщает о применении структурообразователя, содержащего гуаровую и ксантановую камеди в сочетании с камедью рожкового дерева, в технологии сладких консервов для придания готовому продукту кремовой структуры.

Несмотря на то, что существующие работы описывают влияние некоторых наиболее часто используемых полисахаридов на процесс кристаллизации лактозы, на наш взгляд исследовательская база в недостаточной степени охватывает данный вопрос. Ранние исследования, например, Das (2013) и Sánchez-García (2021), описали способность гидроколлоидов (гуммиарабика, каппа- и йота-каррагинанов) влиять на кинетику процесса кристаллизации лактозы в водных системах, не освещая свойства добавки при внесении ее в концентрированную молочную систему. Также требует более глубокого изучения влияние отдельных полисахаридов на кристаллообразование лактозы, так проявления синергетического эффекта при сочетании двух и более полисахаридов.

Целью данного исследования является создание композиции полисахаридов для предотвращения формирования органолептически ощутимых кристаллов лактозы в сгущенном молоке с сахаром. В рамках исследования выполнены задачи по изучению свойств моногидроколлоидов, составлению на их основе бинарных и тринарных композиций, их анализ в аспекте способности к ингибированию кристаллизации лактозы в концентрированных молочно-сахарных системах и установление оптимально приемлемого компонентного состава добавок. Результатами проведенного исследования являлись гипотезы, связанные с механизмом ингибирования роста кристаллов молочного сахара, а также разработка ряда комплексных добавок, обладающих ярко выраженными свойствами в отношении предотвращения процесса спонтанной кристаллизации лактозы.

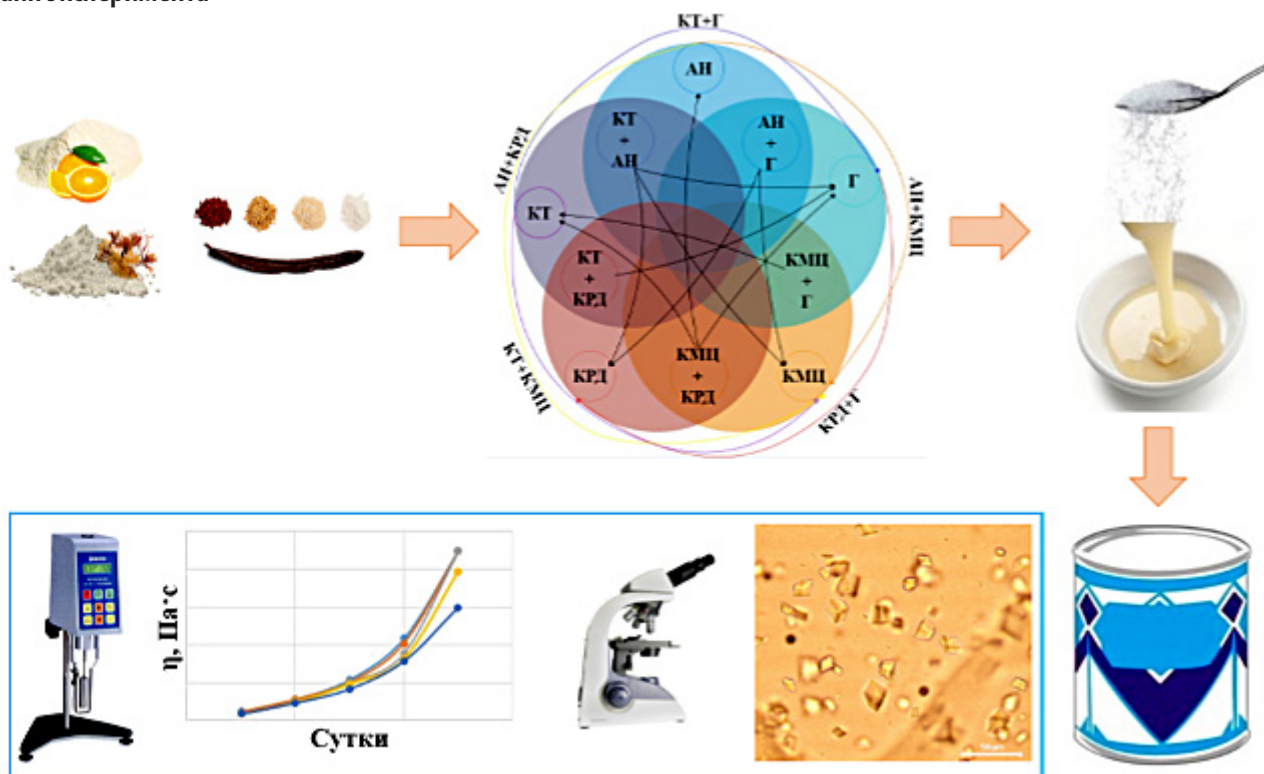
## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

### **Дизайн исследования**

Структурно-иерархическая схема выполнения работ состояла из трех логически взаимосвязанных этапов, необходимых для реализации исследований, в соответствии с поставленной целью и сформулированными задачами (Рисунок 1). Первый этап включал в себя оценку влияния отдельных полисахаридов на процесс кри-

Рисунок 1

### Дизайн эксперимента



сталлизации лактозы в сгущенном молоке с сахаром. На втором этапе был оптимизирован состав полисахаридных композиций с учетом влияния факторов на динамическую вязкость и кристаллообразование. Третий этап посвящен подтверждению заявленных характеристик полисахаридных композиций на протяжении всего периода динамической фазы кристаллизации в сгущенном молоке с сахаром.

### Материалы

Для создания концентрированных модельных молочных систем с сахаром использовали коммерческие образцы сухого обезжиренного молока (ООО «Мелиузовский МКК», Россия), сахар-песок (ГК «Русагро», Россия), сухой гидролизат сывороточных белков по СТО 00419785–039–2018 (ФГАНУ «ВНИМИ», Россия), дистиллированную воду. В качестве полисахаридов, вносимых в молочную систему, применяли низкоэтерифицированный пектин GENU LM 13 CG (CPKelco, США) (НЭП), альгинат натрия 1000 (Jiangsu Benefit Ocean, Китай) (АН), ксантановую камедь Keltrol (CPKelco, США) (КК), гуаровую камедь GuarSar 501 (Sarda, Индия) (ГК), гуммиарабик EmulGold Fiber (Kerry Ingredients & Flavours Ltd., Ир-

ландия) (Г), карбоксиметилцеллюлозу 8000 (Shandong Arctic Chemical, Китай) (КМЦ), камедь рожкового дерева C-175-S (LBG Sicilia S.r.l., Италия) (КРД) и камедь тары (Exandal, LBG Sicilia, Италия) (КТ).

### Выработка концентрированных модельных молочных систем с сахаром

Концентрированные модельные молочные системы с сахаром (КМС) вырабатывали по рецептурам, представленным в Таблице 1, которые соответствовали по физико-химическим показателям СТО ВНИМИ 00419785–064-2022.

Таблица 1

### Компонентный состав концентрированных модельных молочных систем с сахаром на 1000 г

Наименование сырья	Масса, г
Молоко сухое обезжиренное (массовая доля сухих веществ 95,0%; массовая доля белка 34,0%)	207,7
Гидролизат сывороточных белков сухой (массовая доля сухих веществ 97,0%; массовая доля белка 40,0%)	47,6
Сахар-песок (массовая доля сухих веществ 99,86%; массовая доля сахарозы 99,75%)	451,1
Вода питьевая	293,6



Таблица 2

**Симплекс-центроидный план для многокомпонентных смесей**

№ образца	Вариабельные факторы в кодированном виде			Вариабельные факторы в натуральном виде, %		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	1,000	0	0	0,200	0	0
2	0	1,000	0	0	0,200	0
3	0	0	1,000	0	0	0,200
4	0,500	0,500	0	0,100	0,100	0
5	0,500	0	0,500	0,100	0	0,100
6	0	0,500	0,500	0	0,100	0,100
7	0,333	0,333	0,333	0,066	0,066	0,066
8	0,667	0,167	0,167	0,133	0,033	0,033
9	0,167	0,667	0,167	0,033	0,133	0,033
10	0,167	0,167	0,667	0,033	0,033	0,133

Для выработки модельных систем использовали модернизированную гидродинамическую установку Термомикс ТМ-31 (Vorwerk, Германия) с функцией вакуумирования для дегазации молочной смеси. В емкость вносили рецептурное количество воды, после чего осуществляли нагрев до температуры 35–40 °С. В нагретую воду добавляли сухое обезжиренное молоко и диспергировали в течение 15–20 минут при 1200 мин<sup>-1</sup>. Молочную смесь нагревали до температуры 80–85 °С, вносили сахар-песок, при необходимости смешанный с полисахаридами или полисахаридными композициями. Во время технологического процесса контролировали массовую долю влаги в молочно-сахарной смеси и при необходимости стандартизовали добавлением дистиллированной воды. Нормализованную по массовой доле влаги смесь пастеризовали при температуре 93 ± 2 °С без выдержки. После пастеризации готовую модельную систему охлаждали до 8 ± 2 °С и хранили при этих температурных условиях в течение исследуемого периода.

**Проектирование полисахаридных композиций**

На предварительном этапе проектирования полисахаридных композиций был проведен скрининг отдельных полисахаридов, направленный на изучение доза-зависимого влияния (0,05; 0,10; 0,15 и 0,20 %) на изменение динамической вязкости и способности ингибировать/

замедлять кристаллообразование в КМС. Для проектирования и оптимизации внутрикомпозиционного состава полисахаридного комплекса был использован симплекс-центроидный план для многокомпонентных смесей (Таблица 2).

**Инструменты и методы**

**Исследование динамической вязкости**

Измерение показателей динамической вязкости КМС осуществляли при помощи ротационного вискозиметра Brookfield, модель RVDV-II+ Pro по методике<sup>1</sup>. Измерение вязкости проводили при статичной температуре 10 °С при скорости вращения шпинделя (№ S21) 10 RPM. Для оценки индекса восстановления КМС после измерения вязкости продукт перемешивали на мешалке при 100 мин<sup>-1</sup> в течении 5 минут, после чего подвергали повторному измерению вязкости. Индекс восстановления динамической вязкости рассчитывали по формуле:

$$\text{ИВС} = \frac{\mu_n}{\mu_k},$$

где  $\mu_n$  — начальная динамическая вязкость (Па·с);  $\mu_k$  — динамическая вязкость после механического воздействия (Па·с).

<sup>1</sup> Крупенникова, В. Е., Раднаева, В. Д., Танганов, Б. Б. (2011). Определение динамической вязкости на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro. Методическое указание. ВСГТУ.

По результатам полученных значений проводили оценку модельных систем с полисахаридами с точки зрения реологической стабильности при хранении.

### Изучение линейных размеров кристаллов лактозы

Микроструктурные изменения консистенции (размер кристаллов лактозы) в исследуемых образцах осуществляли с использованием метода по определению размеров кристаллов молочного сахара по ГОСТ 29245–91 окуляр-микрометром при увеличении в 150–1000 раз с использованием микроскопа «МИКМЕД-6» с камерой TCA-5.0C (АО «ЛОМО», Россия). Для оценки модельных систем использована система классификации размеров лактозы по группам, характеризующим пороки сладких молочных консервов, согласно Рябовой (2018):

- 1 — однородная (размер кристаллов для этой группы равен 4–12 мкм);
- 2 — слабомучнистая (размер кристаллов 12–16 мкм);
- 3 — мучнистая (размер кристаллов лактозы 16–25 мкм);
- 4 — песчанистая (размер кристаллов более 25 мкм).

### Исследование активности воды

Измерение активности воды ( $A_w$ ) в образцах продукта проводили сорбционно-емкостным методом на приборе «HYDROLAB 3» (Rotronic AG, Швейцария), с цифровой вентилируемой станцией «AwVC-DIO». Измерения про-

водили при контролируемой температуре продукта и окружающей среды (20°C).

## Обработка полученных данных

Средние и максимальные линейные размеры кристаллов лактозы получены посредством обработки массива данных, зафиксированных при микроскопировании препаратов в программе Microsoft Excel 2016. Данные в таблицах представлены в виде средних значений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью данного исследования являлось создание композиции полисахаридов для предотвращения формирования органолептически ощутимых кристаллов лактозы в сгущенном молоке с сахаром. В этой связи результаты разделены на следующие блоки: свойства отдельных полисахаридов и свойства полисахаридных комплексов.

### Свойства отдельных полисахаридов

На первом этапе исследований изучены реологические свойства и склонность к кристаллизации КМС, стабилизированных отдельными полисахаридами. В качестве реперных точек, контролирующих исследуемые параметры, были выбраны 3 и 7 сутки от даты производства модельных систем. Результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3

### Результаты изменения динамической вязкости и размеров кристаллов лактозы в стабилизированных КМС

Наименование образца	Концентрация, %	Динамическая вязкость, Па · с			Линейные размеры кристаллов лактозы (мкм) на 7 сутки	
		0 сутки	3 сутки	7 сутки	Max	Mean
К (Контроль)	—	1,9 ± 0,1	1,9 ± 0,1	2,2 ± 0,1	45,5 ± 2,6	25,2 ± 1,3
НЭП	0,05	4,8 ± 0,1	5,1 ± 0,1	5,8 ± 0,3	65,1 ± 4,2	37,9 ± 3,1
НЭП	0,10	8,5 ± 0,2	10,2 ± 0,4	11,0 ± 0,6	74,9 ± 4,8	37,5 ± 2,9
НЭП	0,15	15,8 ± 0,5	17,9 ± 0,6	21,8 ± 1,6	293,5 ± 11,3	173,1 ± 7,3
НЭП	0,20	30,0 ± 1,4	44,8 ± 1,8	44,8 ± 3,4	53,6 ± 4,1	36,1 ± 3,4
АН	0,05	3,2 ± 0,1	3,9 ± 0,2	3,8 ± 0,1	54,6 ± 4,6	33,8 ± 3,1
АН	0,10	4,1 ± 0,1	4,8 ± 0,1	5,4 ± 0,2	38,8 ± 4,1	28,7 ± 2,0
АН	0,15	5,0 ± 0,1	6,1 ± 0,3	6,2 ± 0,4	42,9 ± 3,2	26,6 ± 1,6
АН	0,20	10,4 ± 0,4	12,0 ± 0,6	12,3 ± 0,8	41,4 ± 2,4	26,2 ± 1,3
КК	0,05	7,3 ± 0,2	7,8 ± 0,4	9,1 ± 0,6	57,0 ± 3,4	30,9 ± 2,4

Окончание Таблицы 3

Наименование образца	Концентрация, %	Динамическая вязкость, Па · с			Линейные размеры кристаллов лактозы (мкм) на 7 сутки	
		0 сутки	3 сутки	7 сутки	Max	Mean
КК	0,10	9,7 ± 0,5	11,1 ± 0,5	11,8 ± 0,8	70,4 ± 4,6	35,0 ± 2,1
КК	0,15	17,9 ± 0,6	18,3 ± 1,1	20,2 ± 1,1	73,1 ± 4,5	39,1 ± 1,9
КК	0,20	22,1 ± 0,7	23,6 ± 1,3	23,5 ± 1,4	53,3 ± 3,2	43,6 ± 3,2
ГК	0,05	2,9 ± 0,1	3,5 ± 0,1	4,6 ± 0,2	65,2 ± 4,0	35,6 ± 2,2
ГК	0,10	2,8 ± 0,1	3,8 ± 0,1	4,8 ± 0,1	48,7 ± 2,9	33,3 ± 1,9
ГК	0,15	3,0 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,8 ± 0,1	64,5 ± 4,2	40,0 ± 2,1
ГК	0,20	3,3 ± 0,1	4,2 ± 0,2	5,0 ± 0,3	45,5 ± 2,8	32,0 ± 1,7
Г	0,05	2,9 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,8 ± 0,1	48,1 ± 3,2	34,4 ± 1,5
Г	0,10	2,8 ± 0,1	3,5 ± 0,1	3,8 ± 0,1	37,7 ± 2,4	24,3 ± 1,1
Г	0,15	3,1 ± 0,1	3,6 ± 0,1	4,0 ± 0,4	37,1 ± 2,0	28,2 ± 1,2
Г	0,20	3,6 ± 0,1	3,9 ± 0,1	4,0 ± 0,3	47,4 ± 3,6	26,6 ± 1,0
КМЦ	0,05	4,8 ± 0,2	5,9 ± 0,1	6,0 ± 0,1	143,9 ± 6,9	60,8 ± 2,7
КМЦ	0,10	8,0 ± 0,5	8,1 ± 0,2	8,2 ± 0,3	63,4 ± 3,5	31,0 ± 1,6
КМЦ	0,15	10,0 ± 0,5	10,1 ± 0,3	11,8 ± 0,5	118,5 ± 5,3	39,7 ± 2,0
КМЦ	0,20	15,4 ± 0,6	16,2 ± 0,8	19,8 ± 0,8	57,2 ± 2,7	24,9 ± 1,2
КРД	0,05	4,7 ± 0,1	4,7 ± 0,1	5,8 ± 0,1	49,6 ± 2,1	26,4 ± 1,4
КРД	0,10	4,8 ± 0,1	5,9 ± 0,2	8,4 ± 0,4	42,2 ± 2,0	24,6 ± 1,0
КРД	0,15	7,0 ± 0,4	8,2 ± 0,3	10,0 ± 0,5	99,2 ± 5,2	30,5 ± 1,2
КРД	0,20	7,1 ± 0,3	9,9 ± 0,6	10,9 ± 0,5	64,5 ± 3,1	29,8 ± 1,4
КТ	0,05	5,7 ± 0,3	5,8 ± 0,1	6,6 ± 0,1	80,3 ± 3,9	40,7 ± 2,3
КТ	0,10	6,3 ± 0,4	6,4 ± 0,1	9,6 ± 0,2	74,3 ± 3,5	26,2 ± 1,1
КТ	0,15	7,9 ± 0,2	9,6 ± 0,3	11,2 ± 0,5	56,9 ± 2,9	31,6 ± 1,7
КТ	0,20	8,2 ± 0,4	11,7 ± 0,5	14,9 ± 0,8	86,5 ± 4,6	33,9 ± 1,7

В контрольном образце при хранении в течение семи суток в условиях спонтанной кристаллизации вязкость выросла незначительно, однако, размер кристаллов лактозы превышал максимально допустимое значение в 1,7 раза (более 15 мкм) (Таблица 3). При этом, в данной системе наблюдались единичные кристаллы лактозы, в 1,8 раза превышающие медианные значения для образца. Отмечено, что большинство полисахаридов во всех исследуемых концентрациях (0,05–0,2 %) не обладают ярко выраженными свойствами подавления кристаллизации. Для образцов АН (в концентрации более 0,1 %), Г (в концентрации более 0,1 %), КМЦ (0,2 %), КРД (0,05–0,2 %) и КТ (0,1 %) степень кристаллизации лактозы находилась на сопоставимо схожем уровне в сравнении с контрольным образцом. Для систем НЭП (0,05; 0,1;

0,2 %), АН (0,05 %), КК (0,05–0,2 %), ГК (0,05–0,2 %), Г (0,05 %), КМЦ (0,1–0,15 %) и КТ (0,05; 0,15; 0,2 %) средний линейный размер кристаллов лактозы в среднем превышал размеры кристаллов в контрольном образце в 1,6 раза. Отдельно следует отметить, что полисахариды НЭП и КМЦ в дозировках 0,15 и 0,05 %, соответственно, приводили к значимому увеличению размеров кристаллов лактозы в 6,9 и 2,4 раза, в сравнении с контрольным образцом. Для всех стабилизированных образцов являлось характерным дозозависимое увеличение динамической вязкости. Кроме того, при внесении в КМС полисахаридов НЭП и КК в концентрациях более 0,1 %, а также 0,2 % для КМЦ наблюдалось повышение показателя динамической вязкости, превышающее допустимое значение более чем в 1,3 раза. Несмотря



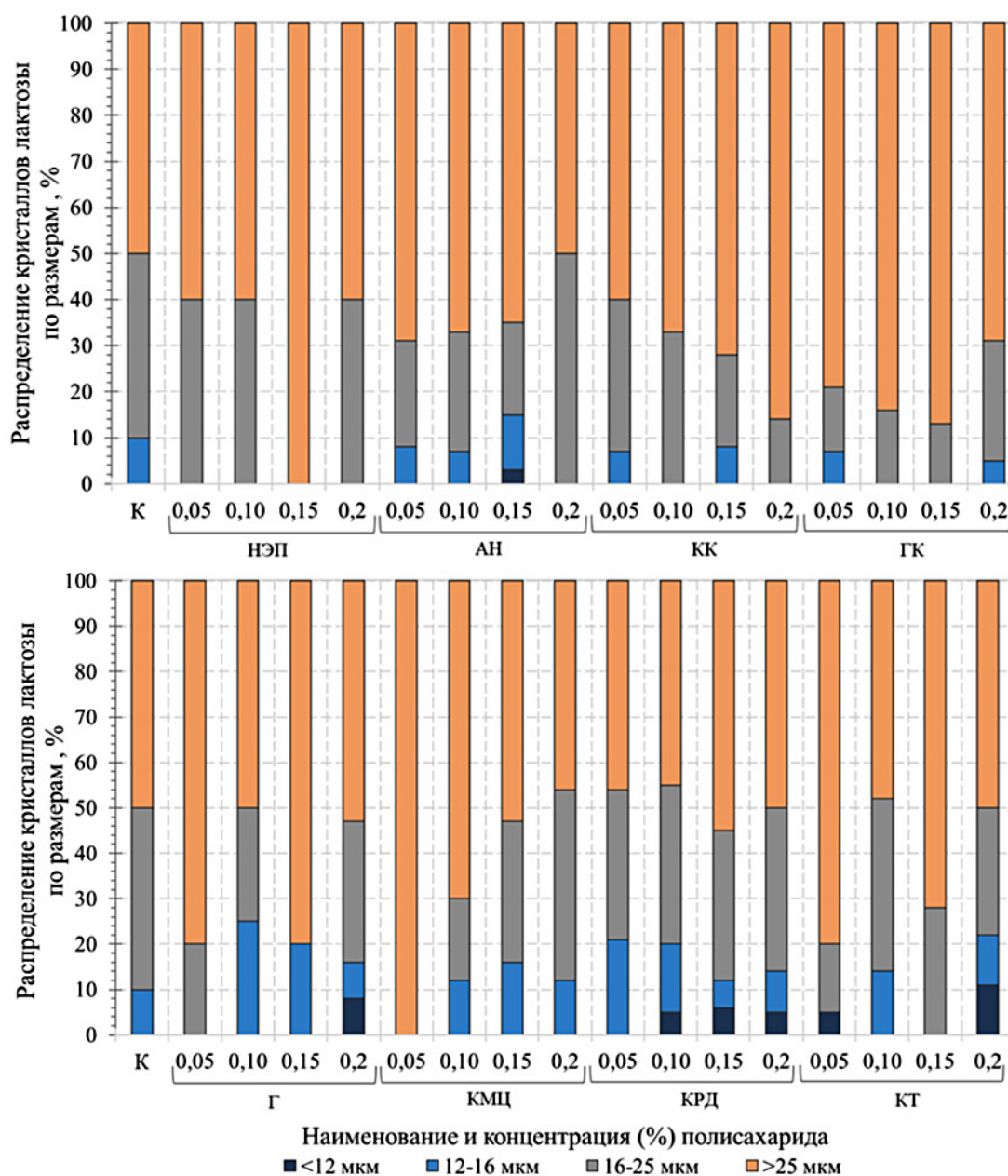
тря на отсутствие достоверного отличия в медианных размерах кристаллов лактозы, отмечено различие в их распределении по группам (Рисунок 2).

Как показано на Рисунке 2, в контрольном образце основную массу составляют кристаллы с размерами более 25 мкм, в то время как кристаллы с размерами менее 12 мкм отсутствуют. Сопоставление распределения кристаллов в стабилизированных КМС позволило установить, что при идентичных медианных значениях раз-

меров кристаллов лактозы в образцах АН (0,15 %), Г (0,2 %), КРД (0,1–0,2 %) и КТ (0,05; 0,2 %) наблюдалось увеличение доли кристаллов размером менее 12 мкм, что может свидетельствовать о контролируемом полисахаридами процессе зародышеобразования. Одновременно с этим для КМЦ (0,15 %) показано увеличение доли кристаллов размерами 12–16 мкм, что указывает на процесс снижения скорости кристаллизации, индуцируемый КМЦ.

Рисунок 2

### Результаты оценки распределения кристаллов лактозы по размерам в КМС



## Свойства полисахаридных комплексов

В связи с этим, для дальнейшего исследования были выбраны стабилизационные системы АН, Г, КМЦ, КРД, КТ. На втором этапе при помощи симплекс-центроидного плана для многокомпонентных смесей изучены внутри-композиционные взаимодействия полисахаридов и их влияние на динамическую вязкость и кристаллообразование в КМС (Таблица 4).

При исследовании бикомпонентных КМС для большинства стабилизационных систем (АН:КТ; АН:КРД; АН:КМЦ; АН:Г; КТ:Г; КМЦ:Г) показано отсутствие достоверных различий в значениях медианных размеров кристаллов лактозы, в сравнении с ранее изученными образцами, стабилизированными отдельными полисахаридами. При этом установлено, данные комплексы формировали более прочную структуру матрикса, в отличие от КМС, исследованных на первом этапе. Следует

Таблица 4

### Результаты изменения динамической вязкости и размеров кристаллов лактозы в КМС, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами

№ образца	Вариабельные факторы в натуральном виде, %					Динамическая вязкость (Па · с) на 7 сутки хранения	Средний линейный размер кристаллов лактозы (мкм) на 7 сутки хранения
	АН	КТ	КРД	КМЦ	Г		
1	0,100	0,100	0	0	0	9,8 ± 0,4	29,6 ± 1,3
2	0,100	0	0,100	0	0	6,9 ± 0,3	24,8 ± 1,3
3	0,100	0	0	0,100	0	8,3 ± 0,4	22,7 ± 1,0
4	0,100	0	0	0	0,100	5,9 ± 0,3	23,2 ± 1,2
5	0	0,100	0,100	0	0	6,8 ± 0,4	39,4 ± 2,0
6	0	0,100	0	0,100	0	6,4 ± 0,3	49,55 ± 1,8
7	0	0,100	0	0	0,100	6,1 ± 0,3	30,4 ± 1,2
8	0	0	0,100	0,100	0	6,4 ± 0,4	56,1 ± 2,3
9	0	0	0,100	0	0,100	5,9 ± 0,2	46,6 ± 2,3
10	0	0	0	0,100	0,100	4,8 ± 0,2	23,5 ± 1,1
11	0,066	0,066	0,066	0	0	7,9 ± 0,4	5,5 ± 0,2
12	0,066	0,066	0	0	0,066	7,6 ± 0,3	50,8 ± 1,9
13	0,066	0,066	0	0,066	0	8,1 ± 0,4	15,4 ± 0,5
14	0,066	0	0,066	0,066	0	11,6 ± 0,5	29,5 ± 1,2
15	0,066	0	0,066	0	0,066	8,0 ± 0,4	91,6 ± 4,1
16	0,066	0	0	0,066	0,066	7,2 ± 0,3	62,5 ± 2,9
17	0	0,066	0,066	0,066	0	9,5 ± 0,4	117,85 ± 4,8
18	0	0,066	0,066	0	0,066	8,1 ± 0,4	120,2 ± 6,1
19	0	0,066	0	0,066	0,066	7,2 ± 0,3	4,1 ± 0,1
20	0	0	0,066	0,066	0,066	6,0 ± 0,3	5,9 ± 0,3
21	0,136	0,032	0,032	0	0	7,3 ± 0,4	22,7 ± 0,8
22	0,136	0,032	0	0,032	0	8,5 ± 0,4	64,1 ± 3,6
23	0,136	0,032	0	0	0,032	10,0 ± 0,5	26,5 ± 1,3
24	0,136	0	0,032	0	0,032	8,6 ± 0,3	35,5 ± 1,7
25	0,136	0	0,032	0,032	0	10,2 ± 0,5	26,7 ± 1,2
26	0,136	0	0	0,032	0,032	7,3 ± 0,2	20,0 ± 0,9
27	0,032	0,136	0,032	0	0	8,2 ± 0,3	29,0 ± 1,2
28	0,032	0,136	0	0,032	0	7,2 ± 0,3	21,9 ± 0,8

№ образца	Вариабельные факторы в натуральном виде, %					Динамическая вязкость (Па · с) на 7 сутки хранения	Средний линейный размер кристаллов лактозы (мкм) на 7 сутки хранения
	АН	КТ	КРД	КМЦ	Г		
29	0,032	0,136	0	0	0,032	9,5 ± 0,4	33,3 ± 1,3
30	0	0,136	0,032	0,032	0	9,2 ± 0,5	94,4 ± 3,6
31	0	0,136	0,032	0	0,032	11,2 ± 0,5	97,7 ± 4,7
32	0	0,136	0	0,032	0,032	11,6 ± 0,6	139,1 ± 6,8
33	0,032	0,032	0,136	0	0	6,9 ± 0,3	42,2 ± 1,6
34	0,032	0	0,136	0,032	0	7,6 ± 0,4	27,3 ± 1,0
35	0,032	0	0,136	0	0,032	9,1 ± 0,5	56,1 ± 2,4
36	0	0,032	0,136	0	0,032	8,5 ± 0,5	111,1 ± 4,2
37	0	0,032	0,136	0,032	0	10,1 ± 0,5	97,9 ± 5,1
38	0	0	0,136	0,032	0,032	7,2 ± 0,3	65,8 ± 3,2
39	0,032	0,032	0	0,136	0	6,0 ± 0,3	34,2 ± 1,2
40	0	0,032	0,032	0,136	0	7,6 ± 0,3	94,6 ± 4,6
41	0,032	0	0,032	0,136	0	6,0 ± 0,2	18,7 ± 1,1
42	0,032	0	0	0,136	0,032	5,7 ± 0,2	32,9 ± 2,3
43	0	0,032	0	0,136	0,032	5,8 ± 0,2	24,0 ± 1,4
44	0	0	0,032	0,136	0,032	6,3 ± 0,2	3,5 ± 0,1
45	0,032	0,032	0	0	0,136	5,3 ± 0,1	41,6 ± 2,0
46	0,032	0	0,032	0	0,136	8,7 ± 0,4	50,3 ± 2,6
47	0,032	0	0	0,032	0,136	5,7 ± 0,2	80,2 ± 4,0
48	0	0,032	0,032	0	0,136	5,5 ± 0,3	40,2 ± 1,8
49	0	0,032	0	0,032	0,136	4,6 ± 0,2	32,2 ± 1,5
50	0	0	0,032	0,032	0,136	4,4 ± 0,1	2,7 ± 0,1

подчеркнуть, что для систем КТ:КРД; КТ:КМЦ; КРД:КМЦ; КРД:Г отмечено увеличение медианных значений размеров кристаллов более 40 мкм. Данная особенность может быть обоснована эффектом антагонизма при использовании двух гидроколлоидов. Динамическая вязкость образцов находилась в допустимом диапазоне значений и была в 3–4 раза больше показателя вязкости контрольного образца. Анализ трехкомпонентных композиций позволил выявить синергетический эффект для АН:КТ:Г и КТ:КМЦ:Г в равных соотношениях; КРД:КМЦ:Г, а также для КРД:КМЦ:Г в трех соотношениях: в равных, с преобладающим содержанием КМЦ, с преобладающим содержанием Г, заключающийся в ингибировании роста кристаллов лактозы, при сохранении значений динамической вязкости в диапазоне 4,4–7,9 Па·с. Для остальных КМС значимый синергетический эффект не обнаружен, а для некоторых детектирован сильно выраженный антагонистический эффект,

заключающийся в формировании кристаллов лактозы на уровне превышающем 100 мкм (АН:КРД:Г в равных соотношениях; КТ:КРД:КМЦ (в равных соотношениях; с преобладающим содержанием КРД и КМЦ); КТ:КРД:Г (в равных соотношениях; с преобладающим содержанием КРД); КТ:КМЦ:Г (в равных соотношениях; с преобладающим содержанием КТ); КРД:КМЦ:Г (в равных соотношениях)).

Для масштабирования полноценного периода кристаллизации лактозы выработаны и заложены на хранение (при температуре  $4 \pm 2$  °С, 100 суток) образцы КМС, стабилизированные пятью наилучшими трехкомпонентными композициями полисахаридов. Данный период хранения выбран исходя из кинетики кристаллообразования лактозы, в соответствии с которой фаза активного роста кристаллов наблюдается в течении 100 дней с момента производства продукта (Виноградова, 2018).

Таблица 5

**Результаты изменения динамической вязкости в КМС, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами**

№ образца	Динамическая вязкость (Па · с) на 10, 40, 70 и 100 сутки хранения				Индекс восстановления динамической вязкости на 10, 40, 70 и 100 сутки хранения			
	10	40	70	100	10	40	70	100
К	2,2 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,9 ± 0,1	3,1 ± 0,1	0,96	0,95	0,94	0,94
АН:КТ:КРД (№11)	8,2 ± 0,4	8,7 ± 0,4	10,6 ± 0,6	11,2 ± 0,5	0,94	0,94	0,84	0,83
КТ:КМЦ:Г (№19)	6,9 ± 0,3	7,8 ± 0,3	9,2 ± 0,6	9,8 ± 0,5	0,95	0,94	0,93	0,93
КРД:КМЦ:Г (№44)	5,7 ± 0,2	6,6 ± 0,3	10,8 ± 0,6	10,8 ± 0,4	0,96	0,92	0,89	0,88
КРД:КМЦ:Г (№50)	4,7 ± 0,2	5,2 ± 0,3	6,5 ± 0,4	7,7 ± 0,4	0,96	0,92	0,92	0,90
КРД:КМЦ:Г (№20)	6,1 ± 0,3	7,6 ± 0,5	9,4 ± 0,5	10,1 ± 0,5	0,95	0,94	0,89	0,84

Для изучения изменений, происходящих в КМС в процессе хранения, образцы исследовали в реперных точках 10, 40, 70 и 100 суток. В Таблице 5 представлены исследование изменения показателей динамической вязкости в КМС, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами.

Согласно данным, приведенным в Таблице 5, для всех КМС показатели динамической вязкости находились в допустимом диапазоне значений. При этом, динамическая вязкость данных образцов превышала значения динамической вязкости контрольного образца в 3–4 раза. Что касается восстановления структуры после ее механического разрушения, отмечено, что для контрольного образца на 100 сутки показатель практически не изменился, что может свидетельствовать о высоких тиксотропных свойствах системы, обеспечивающихся

белково-углеводным модулем. Следует обратить внимание на аналогичный показатель индекса восстановления динамической вязкости КТ:КМЦ:Г. Способность к восстановлению динамической вязкости после механической нагрузки для остальных систем находилась на более низком уровне.

Показатели активности воды и медианных размеров кристаллов лактозы в исследуемых системах представлены в Таблице 6.

Активность воды контрольного образца и образцов, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами, в течение 100 суток хранения изменялась незначительно, в пределах погрешности метода. В аспекте ингибирования роста кристаллов лактозы установлено, что наилучший эффект достигал

Таблица 6

**Результаты измерений активности воды и медианных размеров кристаллов лактозы в КМС, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами**

№ образца	Активность воды на 10, 40, 70 и 100 сутки хранения				Средний линейный размер кристаллов лактозы (мкм) на 10, 40, 70 и 100 сутки хранения			
	10	40	70	100	10	40	70	100
К	0,874 ± 0,005	0,868 ± 0,005	0,870 ± 0,005	0,865 ± 0,005	20,9 ± 1,1	96,5 ± 4,8	101,3 ± 5,0	103,7 ± 5,1
АН:КТ:КРД (№11)	0,870 ± 0,005	0,870 ± 0,005	0,866 ± 0,005	0,864 ± 0,005	6,4 ± 0,3	25,6 ± 1,2	33,2 ± 1,3	34,3 ± 1,2
КТ:КМЦ:Г (№19)	0,864 ± 0,005	0,866 ± 0,005	0,860 ± 0,005	0,864 ± 0,005	5,3 ± 0,3	7,4 ± 0,2	10,3 ± 0,5	10,6 ± 0,6
КРД:КМЦ:Г (№44)	0,868 ± 0,005	0,863 ± 0,005	0,863 ± 0,005	0,864 ± 0,005	4,8 ± 0,1	12,0 ± 0,5	11,8 ± 0,4	13,2 ± 0,5
КРД:КМЦ:Г (№50)	0,867 ± 0,005	0,866 ± 0,005	0,862 ± 0,005	0,862 ± 0,005	3,2 ± 0,1	9,0 ± 0,3	10,1 ± 0,5	13,5 ± 0,5
КРД:КМЦ:Г (№20)	0,864 ± 0,005	0,860 ± 0,005	0,862 ± 0,005	0,857 ± 0,005	7,3 ± 0,3	14,5 ± 0,6	20,2 ± 1,1	17,6 ± 0,8



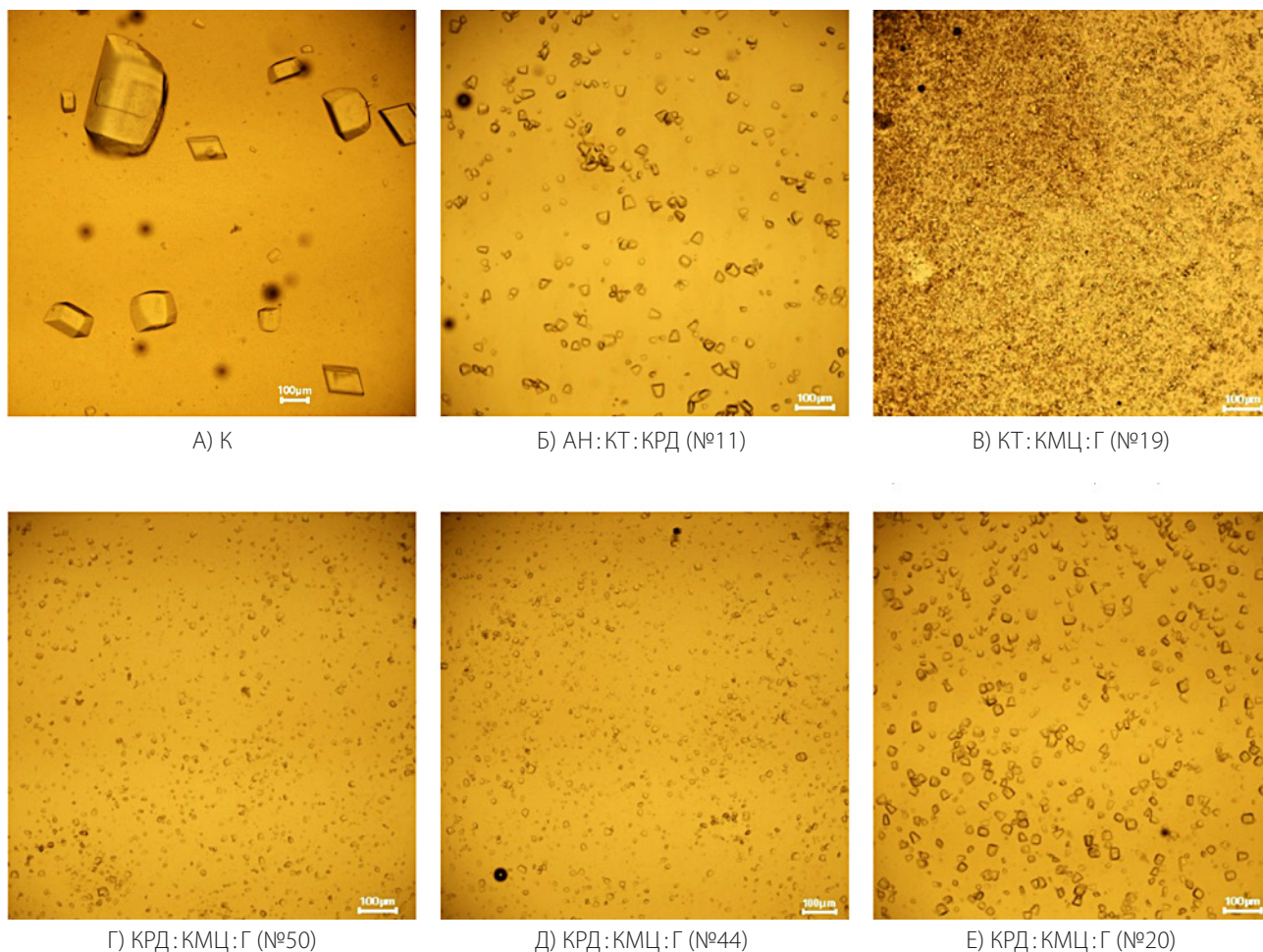
ся при стабилизации КМС системой КТ:КМЦ:Г, размер кристаллов в которой на 100 сутки хранения составил 10,6 мкм, что входит в допустимый диапазон значений и в 10 раз меньше значений контрольного образца. Для образцов под номерами 44 и 50 также установлен эффект сдерживания роста кристаллов. Размеры кристаллов в данных КМС составили 13,2 и 13,5 мкм, соответственно. КМС, стабилизированные системами под номерами 11 и 20, несмотря на ингибирование кристаллизации в краткосрочный период (10 суток), по результатам исследования не показали положительного эффекта в долгосрочный период хранения (100 суток). Таким образом, из результатов Таблицы 6 прослеживается тенденция к существенному замедлению роста кристаллов лактозы для большинства КМС

уже на 70 сутки. Экземплификация кристаллизации лактозы в КМС представлена на Рисунке 3.

Самые большие кристаллы идентифицированы, как и предполагалось, в контрольном образце со спонтанной кристаллизацией (рисунок 3А), в то время как стабилизация КМС полисахаридными комплексами приводила к изменению профиля кристаллизации лактозы, в частности к образованию большого количества кристаллов, но со значительно меньшими размерами. Наилучшим распределением по размерам кристаллов лактозы характеризовалась система КТ:КМЦ:Г (рисунок 3В). В КМС, стабилизированном КТ:КМЦ:Г, сформировано большое количество мелких дисперсно-распределенных кристаллов, что позволяет судить об участии

Рисунок 3

**Результаты микроскопирования КМС, стабилизированных многокомпонентными полисахаридными комплексами на 100 сутки хранения**





добавки в процессе зародышеобразования и регулирования спонтанной кристаллизации в продукте. В то же время в системах АН:КТ:КРД и КРД:КМЦ:Г отмечен эффект агломерации кристаллов лактозы, что в конечном счете приведет к органолептически идентифицируемым кристаллам лактозы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования, ассоциированные с изучением реологических свойств и склонности к кристаллизации КМС, стабилизированных отдельными полисахаридами, установили, что в системах НЭП (0,05; 0,1; 0,2 %), АН (0,05 %), КК (0,05–0,2 %), ГК (0,05–0,2 %), Г (0,05 %), КМЦ (0,1–0,15 %) и КТ (0,05; 0,15; 0,2 %) в течение семи суток происходит формирование кристаллов лактозы, размеры которых в среднем превышают 35 мкм. В настоящем исследовании не установлен эффект сдерживания роста кристаллов лактозы в концентрированных молочных системах с сахаром при внесении НЭП и АН, о котором заявлено в работе (Писарева, 2016). Аналогичные данные по предотвращению порока консистенции сгущенных молочных консервов с сахаром «песчанистость», описанные Portnoy (2021) для КК, также не подтверждены нашими исследованиями. Для положительно охарактеризованных в настоящей работе полисахаридов АН, Г, КМЦ, КРД и КТ достоверных данных в научной литературе по их влиянию на кристаллизацию лактозы в концентрированных молочных системах с сахаром не обнаружено. Данная особенность может быть обоснована низкой эффективностью использования отдельных полисахаридов, что также установлено в нашей работе. В связи с этим, большое количество научных трудов последних 10 лет посвящено рассмотрению комплексных добавок и их межмолекулярных взаимодействий, в том числе в молочных продуктах с промежуточной влажностью. Prajapati (2013), Gao (2020), Gorji (2018) описали механизм взаимодействия растительных камедей с полисахаридами иного происхождения, заключающийся в формировании водородных связей между незамещенными радикалами КТ и КРД и гидроксильными группами АН и КМЦ. При этом Варганов (2008) и Косова (2010) подчеркивают возможность использования подобных сочетаний гидроколлоидов в технологии концентрированных молочных продуктов с сахаром. Эти данные подтверждают результаты эмпирических исследований, представленных в нашей статье. Zhaoliang (2019) установлено положи-

тельный эффект при внесении 0,2 % КМЦ в систему, содержащую 1 % АН, ввиду межмолекулярных взаимодействий двух полисахаридов, что также отражено в настоящем исследовании. АН и Г, несмотря на одинаковый отрицательный заряд молекул, также показали положительный эффект при совместном использовании в КМС, заключающийся в формировании устойчивого геля и препятствовании формированию агломератов кристаллов лактозы.

Данные о взаимодействии двух полисахаридов приведены в исследованиях Bayarri (2009) и Takeuchi (2000), описывающих механизм межмолекулярного взаимодействия как формирование электростатических соединений между положительно заряженными фрагментами гуммиарабика и отрицательно заряженными карбоксильными группами альгината натрия. Кроме того, подтверждено слабое межмолекулярное взаимодействие КМЦ и Г, установленное Keogh (1996). При этом, для композиций, содержащих КМЦ и КРД, в ходе исследования детектирован антагонизм. Подобные сведения ранее не представлены в научно-технической литературе, однако, положительный эффект от совместного использования полисахаридов отражен в работе Arbuckle (1986), где автор отмечают ингибирование роста кристаллов льда в мороженом посредством механизма адсорбции гидроколлоидов на поверхности кристалла и препятствования диффузии между фазой пищевой системы, содержащей мелкие кристаллические фрагменты, и поверхностью льда, способствующей увеличению кристалла в размерах. Для КМС аналогичных свойств контролирования кристаллизации лактозы, как в случае кристаллов льда, не установлено, предположительно ввиду значительных различий в составе и коллоидных состояниях матриц мороженого и концентрированной молочной системы с сахаром.

Следует отметить, что настоящая работа проведена с использованием только обезжиренных концентрированных молочных модельных систем. В перспективе представляет интерес изучение свойств полисахаридных комплексов на модельных системах, содержащих жировой компонент животного или растительного происхождения, или их смеси. Ожидаемый результат исследований в данной области позволит усовершенствовать технологию производства и повысить качество молочных консервов с сахаром.

## ВЫВОДЫ

В работе представлены данные о влиянии отдельных полисахаридов, а также их комплексов на процесс кристаллизации лактозы в концентрированных молочных системах с сахаром о формировании устойчивой структуры матриц, отражающие способность оказывать как положительное, так и отрицательное воздействие гидроколлоидов на процесс кристаллизации лактозы и изменения динамической вязкости. Способность ингибировать рост кристаллов молочного сахара показали АН (в концентрации более 0,1 %), Г (в концентрации более 0,1 %), КМЦ (0,2 %), КРД (0,05–0,2 %) и КТ (0,1 %), степень кристаллизации лактозы находилась на сопоставимо схожем уровне в сравнении с контрольным образцом. Также, следует обратить внимание на выявленную в процессе изучения модельных систем способность гуммиарабика повышать структурную устойчивость молочных систем и препятствовать формированию агломератов крупных кристаллов лактозы в концентрированных молочных системах.

На этапе исследования внутрикомпозиционных взаимодействий комплексов полисахаридов и последующем масштабировании процесса кристаллизации лактозы в концентрированных системах с сахаром выделена композиция КТ:КМЦ:Г, проявляющая наиболее

ярко выраженные свойства к ингибированию роста кристаллов лактозы, а также обладающая высокими тиксотропными свойствами и степенью связывания свободной влаги в продукте. В практическом аспекте применение данной добавки для производства сгущенных молочных продуктов с сахаром методом восстановления сухих компонентов может заменить классический процесс внесения затравки мелкокристаллической лактозы, а соответственно снизить энерго- и металлоемкость процесса кристаллизации лактозы в продукте.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Барковская Ирина Александровна:** проведение исследования, ресурсы, администрирование данных.

**Кручинин Александр Геннадьевич:** методология, верификация данных, администрирование данных.

**Туровская Светлана Николаевна:** администрирование данных.

**Илларионова Елена Евгеньевна:** проведение исследования, ресурсы.

**Большакова Екатерина Ивановна:** формальный анализ, верификация данных.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Варганов, В. А. (2008). Стабилизаторы «СТМ». *Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья*, (3), 206–213.
- Varganov, V. A. (2008). Stabilizers "STM". *Current Issues in Meat and Dairy Processing*, (3), 206–213. (In Russ.)
- Виноградова, Ю. В. (2018). Теоретические и практические аспекты процесса кристаллизации лактозы в производстве сгущенных молочных консервов с сахаром. *Молочнохозяйственный вестник*, 3(31), 79–90.
- Vinogradova, Y. V. (2018). Theoretical and practical aspects of lactose crystallization in the production of condensed milk with sugar. *Dairy Industry Bulletin*, 3(31), 79–90. (In Russ.)
- Галстян, А. Г., Илларионова, Е. Е., Радаева, И. А., Туровская, С. Н., Червецов, В. В., & Петров, А. Н. (2012). Новый национальный стандарт на вареное сгущенное молоко с сахаром. *Молочная промышленность*, (8), 36–37.
- Galstyan, A. G., Illarionova, E. E., Radaeva, I. A., Turovskaya, S. N., Chervetsov, V. V., & Petrov, A. N. (2012). New national standard for boiled condensed milk with sugar. *Dairy Industry*, (8), 36–37. (In Russ.)
- Гнездилова, А. И., & Куренкова, Л. А. (2014). Реологические характеристики консервированного молочного продукта со сложным углеводным составом. *Молочнохозяйственный вестник*, 1(13), 56–63.
- Gnezdilova, A. I., Kurenkova, L. A. (2014). Rheological characteristics of canned dairy product with complex carbohydrate composition. *Dairy Industry Bulletin*, 1(13), 56–63. (In Russ.)
- Голубева, Л. В., Пожидаева, Е. А., & Матвиенко, А. А. (2020). Формирование состава молокосодержащих консервов с сахаром. *Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством*, 1(1), 130–133. <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-130-133>
- Golubeva, L. V., Pozhidaeva, E. A., & Matvienko, A. A. (2020). Formation of the composition of milk-containing products

- with sugar. *Current Issues in the Dairy Industry, Intersectoral Technologies, and Quality Management Systems*, 1(1), 130–133. (In Russ.) <https://doi.org/10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-130-133>
- Косова, И. А. (2010). Молокосодержащий продукт «Мастер Сгущёнов». *Молочная промышленность*, (10), 54–55.
- Kosova, I. A. (2010). Milk-Containing product “Master Sgushchenov”. *Dairy Industry*, (10), 54–55. (In Russ.)
- Писарева, Е. В. (2016). Исследование стабилизационных систем для сгущенных молочных консервов. *Ползуновский вестник*, (1), 29–33.
- Pisareva, E. V. (2016). Study of stabilization systems for condensed milk preserves. *Polzunov Journal*, (1), 29–33. (In Russ.)
- Радаева, И. А. Гордeziани, В. С., & Шулькина, С. П. (1986). *Технология молочных консервов и заменителей цельного молока: Справочник*. Агропромиздат.
- Radaeva, I. A., Gordezhiyani, V. S., & Shulкина, S. P. (1986). Technology of dairy preserves and whole milk substitutes: Handbook. Agropromizdat. (In Russ.)
- Радаева, И. А., Илларионова, Е. Е., & Туровская, С. Н. (2020). К вопросу изучения микроструктурных изменений молочных консервов в процессе длительного хранения. *Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов: Сборник научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИИХ* (с. 445–452). Амирит.
- Radaeva, I. A., Illarionova, E. E., & Turovskaya, S. N. (2020). On the study of microstructural changes in dairy preserves during long-term storage. *Innovative Technologies for Processing and Storing Agricultural Raw Materials and Food Products: Collection of Scientific Papers of Scientists and Specialists on the 90th Anniversary of VNIKH* (pp. 445–452). Amirith. (In Russ.)
- Рябова, А. Е., Галстян, А. Г., Малова, Т. И., Радаева, И. А., & Туровская, С. Н. (2014). К вопросу о гетерогенной кристаллизации лактозы в технологиях сгущенных молочных продуктов с сахаром. *Техника и технология пищевых производств*, 1(32), 78–83.
- Ryabova, A. E., Galstyan, A. G., Malova, T. I., Radaeva, I. A., & Turovskaya, S. N. (2014). On the issue of heterogeneous lactose crystallization in technologies for condensed milk products with sugar. *Engineering and Technology of Food Production*, 1(32), 78–83. (In Russ.)
- Рябова, А. Е., Хуршудян, С. А., Семипятный, В. К. (2018). Совершенствование методологии оценки консистенции продуктов, склонных к спонтанной кристаллизации сахаров. *Пищевая промышленность*, 12, С. 74–76.
- Ryabova, A. E., Khurshudyan, S. A., & Semipyatny, V. K. (2018). Improvement of the methodology for assessing the consistency of products prone to spontaneous sugar crystallization. *Food Industry*, 12, 74–76. (In Russ.)
- Туровская, С. Н., Галстян, А. Г., Петров, А. Н., Радаева, И. А., Илларионова, Е. Е., Семипятный, В. К., & Хуршудян, С. А. (2018). Безопасность молочных консервов как интегральный критерий эффективности их технологии. Российский опыт. *Пищевые системы*, 2(1), 29–54. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2018-1-2-29-54>
- Turovskaya, S. N., Galstyan, A. G., Petrov, A. N., Radaeva, I. A., Illarionova, E. E., Semipyatny, V. K., & Khurshudyan, S. A. (2018). The safety of dairy preserves as an integral criterion of their technology efficiency. Russian experience. *Food Systems*, 2(1), 29–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2018-1-2-29-54>
- Фатьянов, Е. В., Царьков, И. В., & Тё, Р. Е. (2011). Влияние водных растворов углеводов на активность воды. *Молочная промышленность*, (12), 52–53.
- Fatyanov, E. V., Tsarkov, I. V., & Tyo, R. E. (2011). The influence of aqueous carbohydrate solutions on water activity. *Dairy Industry*, (12), 52–53. (In Russ.)
- Червецов, В. В., & Гнездилова, А. И. (2011). *Интенсификация процессов кристаллизации при производстве молочных продуктов*. Россельхозакадемия.
- Chervetsov, V. V., & Gnezdilova, A. I. (2011). Intensification of crystallization processes in the production of dairy products. Russian Agricultural Academy. (In Russ.)
- Arbuckle, W. S. (1986). *Ice cream* (4<sup>th</sup> ed.). Springer Science+Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7222-0>
- Bayarri, S., González-Tomás, L., & Costell, E. (2009). Viscoelastic properties of aqueous and milk systems with carboxymethyl cellulose. *Food Hydrocolloids*, 23(2), 441–450. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.02.002>
- Ben Said, L., Gaudreau, H., Dallaire, L., Tessier, & M., Fliss, I. (2019). Bioprotective culture: A new generation of food additives for the preservation of food quality and safety. *Industrial Biotechnology*, 15(3), 138–147. <https://doi.org/10.1089/ind.2019.29175.lbs>
- Das, D., Linn, S., Sormoli, M. E., & Langrish, T. A. G. (2013). The effects of WPI and Gum Arabic inhibition on the solid-phase crystallisation kinetics of lactose at different concentrations. *Food Research International*, 54(1), 318–323. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.038>
- Fakhreeva, A. V., Gusakov, V. N., Voloshin, A. I., Tomilov, Y. V., Nifant'ev, N. E., & Dokichev, V. A. (2016). Effect of sodium-carboxymethylcellulose on inhibition of scaling by calcium carbonate and sulfate. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 89(12), 1955–1959. <https://doi.org/10.1134/s1070427216120053>
- Gao, X., Guo, C., Hao, J., Zhao, Z., Long, H., & Li, M. (2020). Adsorption of heavy metal ions by sodium alginate based adsorbent-a review and new perspectives. *International*

- Journal of Biological Macromolecules*, 164, 4423–4434.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.046>
- Ghorbani Gorji, E., Waheed, A., Ludwig, R., Toca-Herrera, J. L., Schleining, G., & Ghorbani Gorji, S. (2018). Complex Coacervation of Milk Proteins with Sodium Alginate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(12), 3210–3220.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b03915>
- Keogh, M. K., Lainé, K. I., & O'Connor, J. F. (1996). Rheology of sodium caseinate-carrageenan mixtures. *Journal of Texture Studies*, 26(6), 635–652. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1996.tb00987.x>
- Malkaj, P., Pierri, E., & Dalas, E. (2005). The crystallization of Hydroxyapatite in the presence of sodium alginate. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 16(8), 733–737.  
<https://doi.org/10.1007/s10856-005-2610-9>
- Pirsa, S., & Hafezi, K. (2023). Hydrocolloids: Structure, preparation method, and application in food industry. *Food Chemistry*, 399, 133967. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133967>
- Portnoy, M., & Barbano, D. M. (2021). Lactose: Use, measurement, and expression of results. *Journal of Dairy Science*, 104(7), 8314–8325. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18706>
- Prajapati, V. D., Jani, G. K., Moradiya, N. G., Randeria, N. P., Nagar, B. J., Naikwadi, N. N., & Variya, B. C. (2013). Galactomannan: A versatile biodegradable seed polysaccharide. *International Journal of Biological Macromolecules*, 60, 83–92.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.05.017>
- Sánchez-García, Y. I., Gutiérrez-Méndez, N., Salmerón, I., Ramos-Sánchez, V. H., Leal-Ramos, M. Y., & Sepúlveda, D. R. (2021). Mutarotation and solubility of lactose as affected by carrageenans. *Food Research International*, 142, 110204. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110204>
- Smykov, I., Gnezdilova, A., Vinogradova, Y., Muzykantova, A., & Lyamina, A. (2019). Cooling curve in production sweetened concentrated milk supplemented with whey: Influence on the size and microstructure of lactose crystals. *Food Science and Technology International*, 25(6), 451–461.  
<https://doi.org/10.1177/1082013219830494>
- Sutton, R. L., & Wilcox, J. (1998). Recrystallization in model ice cream solutions as affected by stabilizer concentration. *Journal of Food Science*, 63(1), 9–11.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb15663.x>
- Takeuchi, H., Yasuji, T., Yamamoto, H., & Kawashima, Y. (2000). Temperature- and Moisture-Induced Crystallization of Amorphous Lactose in Composite Particles with Sodium Alginate Prepared by Spray-Drying. *Pharmaceutical Development and Technology*, 5(3), 355–363.  
<https://doi.org/10.1081/pdt-100100551>