





## Рентгенодифракционный анализ мальтодекстринов, полученных при кислотном и ферментном гидролизе крахмалов





Анастасия М. Федорова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:anastasija.fedorova-af2014@ya.ru">anastasija.fedorova-af2014@ya.ru</a>	 0000-0002-8071-4411
Дмитрий М. Руссаков	<sup>1</sup>	<a href="mailto:dm.russakov@gmail.com">dm.russakov@gmail.com</a>	 0000-0001-5170-7530
Ирина С. Милентьева	<sup>1</sup>	<a href="mailto:irazumnikova@mail.ru">irazumnikova@mail.ru</a>	 0000-0002-3536-562X
Анна В. Позднякова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:anjap12@mail.ru">anjap12@mail.ru</a>	 0000-0002-6854-0850
Ольга Г. Альтшулер	<sup>1</sup>	<a href="mailto:alt_og@bk">alt_og@bk</a>	

<sup>1</sup> Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия

**Аннотация.** Рентгеновская дифракция является одним из методов, который может быть успешно применен для идентификации различных химических соединений в поликристаллических смесях, например, таких как пищевые добавки. Рентгеновская дифракция позволяет понять составы таких смесей. Мальтодекстрин является многофункциональным пищевой добавкой, которую получают путем неполного ферментного или кислотного гидролиза крахмала. Целью проведения исследования является изучение образцов мальтодекстрина на основе картофельного и кукурузного крахмала методом рентгенодифракционного анализа. Основными объектами исследования являлись мальтодекстрин, полученный путем ферментного и кислотного расщепления картофельного и кукурузного крахмала. Для получения дифрактограмм образцов мальтодекстрина применяли порошковый дифрактометр (ДРОН-8, Россия) в параллельных лучах, фокусируемых зеркалом Гебеля (Германия). В ходе исследования дифрактограмм установлена фазовая структура для всех образцов крахмала и мальтодекстринов. Так для мальтодекстрина, полученного при ферментном расщеплении картофельного и кукурузного крахмала установлена аморфная структура, у мальтодекстрина, полученного при кислотном гидролизе картофельного и кукурузного крахмала, присутствует частично кристаллизованная структура. Степень кристаллизации при кислотном расщеплении крахмалов составляет 28 %. В образцах мальтодекстринов, полученных при ферментном гидролизе кукурузного крахмала установлено некоторое содержание кальция (3,69 кэВ), хлора (2,62 и 2,82 кэВ) и калия (3,31 и 3,59 кэВ). В образцах мальтодекстринов, полученных при кислотном расщеплении картофельного и кукурузного крахмала, содержание кальция имеется в большем количестве (4,01 кэВ).

**Ключевые слова:** мальтодекстрины, картофельный и кукурузный крахмал, дифрактограммы, рентгенодифракционный метод.

## X-ray diffraction analysis of maltodextrins obtained by acid and enzyme hydrolysis of starch

Anastasia M. Fedorova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:anastasija.fedorova-af2014@ya.ru">anastasija.fedorova-af2014@ya.ru</a>	 0000-0002-8071-4411
Dmitry M. Russakov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:dm.russakov@gmail.com">dm.russakov@gmail.com</a>	 0000-0001-5170-7530
Irina S. Milentyeva	<sup>1</sup>	<a href="mailto:irazumnikova@mail.ru">irazumnikova@mail.ru</a>	 0000-0002-3536-562X
Anna V. Pozdnyakova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:anjap12@mail.ru">anjap12@mail.ru</a>	 0000-0002-6854-0850
Olga G. Altshuler	<sup>1</sup>	<a href="mailto:alt_og@bk">alt_og@bk</a>	

<sup>1</sup> Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia

**Abstract.** X-ray diffraction is one of the methods that can be successfully applied to identify various chemical compounds in polycrystalline mixtures, for example, such as food additives. X-ray diffraction makes it possible to understand the compositions of such mixtures. Maltodextrin is a multifunctional food additive, which is obtained by incomplete enzymatic or acid hydrolysis of starch. The purpose of the study is to study samples of maltodextrin based on potato and corn starch by X-ray diffraction analysis. The main objects of the study were maltodextrin obtained by enzymatic and acid cleavage of potato and corn starch. To obtain diffractograms of maltodextrin samples, a powder diffractometer (DRON-8, Russia) was used in parallel beams focused by a Goebel mirror (Germany). During the study of diffractograms, the phase structure was established for all starch and maltodextrin samples. Thus, an amorphous structure has been established for maltodextrin obtained by enzymatic cleavage of potato and corn starch, maltodextrin obtained by acid hydrolysis of potato and corn starch has a partially crystallized structure. The degree of crystallization during acid splitting of starches is 28%. In the samples of maltodextrins obtained by enzymatic hydrolysis of corn starch, some content of calcium (3.69 keV), chlorine (2.62 and 2.82 keV) and potassium (3.31 and 3.59 keV) was found. In the samples of maltodextrins obtained by acid splitting of potato and corn starch, the calcium content is present in greater quantities (4.01 keV).

**Keywords:** maltodextrin, potato and corn starch, diffractograms, X-ray diffraction method.

### Введение

Мальтодекстрин является продуктом неполного ферментного, кислотного или кислотного ферментного гидролиза растительного крахмала (картофельный, кукурузный) или крахмалосодержащего сырья (пшеничная мука) [1].

Мальтодекстрин представляет смесь сахаров, в которую входят три молекулы глюкозы (декстрозы), две молекулы мальтозы и молекула мальтотриозы. Главной характеристикой мальтодекстрина является скорость протекания гидролиза крахмала или крахмалосодержащего сырья, то есть

### Для цитирования

Федорова А.М., Руссаков Д.М., Милентьева И.С., Позднякова А.В., Альтшулер О.Г. Рентгенодифракционный анализ мальтодекстринов, полученных при кислотном и ферментном гидролизе крахмалов // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 85. № 1. С. 79–86. doi:10.20914/2310-1202-2022-1-79-86

### For citation

Fedorova A.M., Russakov D.M., Milentyeva I.S., Pozdnyakova A.V., Altshuler O.G. X-ray diffraction analysis of maltodextrins obtained by acid and enzyme hydrolysis of starch. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 85. no. 1. pp. 79–86. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-1-79-86

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

его восстанавливающая способность – декстрозный эквивалент (значение DE). Степень DE мальтодекстрина составляет от 2 до 22% [2]. В России производство мальтодекстрина из крахмалосодержащего сырья и крахмала мало развито в сравнении с другими зарубежными странами. В результате мальтодекстрины в основном поставляются из других стран мира (Китай – 68,1%, Франция – 16,3%, Германия – 3,6%, Словакия – 1,9%, США – 1,3%), так главным поставщиком мальтодекстрина является Китай. Объем импорта мальтодекстрина в Россию в 2020 г. в натуральном выражении составил 589 тыс. тонн, что на 16% выше, чем в 2019 г. Среди всех сегментов, поставку мальтодекстрина в Россию в 2020 г., в стоимостном выражении лидирует торговая марка «Hebei», Китай [3–5]. В результате низкого отечественного производства мальтодекстрина становится актуальным получение мальтодекстрина с определенными параметрами. Так, на базе ФГБУ ВО «Кемеровского государственного университета» разработана технология получения мальтодекстрина путем ферментного и кислотного расщепления из картофельного и кукурузного крахмала для молочной промышленности [6–9].

Рентгенодифракционный анализ играет важную роль в исследовании практически всех твердых веществ [10, 11]. Данный метод используется для: идентификации неизвестных соединений, исследования полиморфизма, идентификации сольватации и солевой формы, определения физико-химических свойств и примесей в исследуемых образцах [12]. Каждое кристаллическое вещество имеет характерную рентгеновскую дифракционную картину с определенным расположением дифракционных линий и их интенсивностями. Дифракционную картину можно рассматривать как набор межплоскостных расстояний  $d$  ( $h$ ,  $k$ ,  $l$ ) и соответствующих им интенсивностей линий. Важно, чтобы каждая фаза, входящая в состав смеси, была независимой в процессе создания дифракционной картины, которая представляет собой сумму дифракционных картин сосуществующих фаз [13]. Полученная дифракционная картина содержит информацию об угле отражения  $\theta$  и длине волны  $\lambda$ , поэтому, используя уравнение Брэгга, можно рассчитать межплоскостное расстояние  $d$  [14]. В отличие от рентгеноспектрального метода анализа, ИК-спектроскопии, Оже-спектроскопии, которые способны установить лишь элементарный состав исследуемых веществ, рентгенодифракционный анализ дает возможность определить, из каких фаз состоит исследуемый образец [15]. Данный метод позволяет применять рентгенофазовый анализ в качестве метода для отличия поддельных

фармацевтических препаратов от подлинных в юридической химии [16]. Таким образом, метод является одним из удобных неразрушающих аналитических инструментов, не требующих специальной пробоподготовки в сравнении с хроматографическими методами анализа. Исходя из актуальности рентгенодифракционного анализа образцы мальтодекстрина проанализированы на наличие примесей и исследована их структура.

**Цель работы** – изучение образцов мальтодекстрина, полученных при неполном ферментном и кислотном расщеплении картофельного и кукурузного крахмала, методом рентгенодифракционного анализа.

### Материалы и методы

В качестве объектов для исследования служили картофельный и кукурузный крахмал («Пышечка», Россия), мальтодекстрины, полученные методом неполного кислотного и ферментного расщепления картофельного и кукурузного крахмала, мальтодекстрина марки («MultyDex Sun Premium», Россия).

Образцы мальтодекстрина получали исходя из методики, описанной в работе Федоровой А.М. и ее коллег [17]. Данная методика описывает технологию получения мальтодекстрина с DE 12–13% из картофельного и кукурузного крахмала путем ферментного расщепления крахмалов, используя ферментный препарат Амилолюкс АТС («Сиббиофарм», Россия), и путем кислотного гидролиза, используя 10% серную кислоту в качестве катализатора.

Дифрактограммы получены на порошковом дифрактометре («ДРОН-8», Россия) в параллельных лучах, фокусируемых зеркалом Гебеля (Германия), с системой быстрой регистрации на основе стрипового позиционно-чувствительного кремниевоего детектора (Mythen 2R 1D, Швейцария) и трубкой с медным анодом (Cu K $\alpha$ ,  $\lambda = 1.5406$  Å). Диапазон регистрации по  $2\theta$  2–100°, эффективный шаг сканирования 0.0144°.

Образцы мальтодекстрина готовили методом прессования в плоских кварцевых кюветах (чистые и обезжиренные), всю поверхность кювет с образцами тщательно выравнивали специальным шпателем. Далее кювету устанавливали в дифрактометр и закрепляли держателем для порошковых образцов с вращением, затем осуществлялось сканирование образца направленным рентгеновским пучком дифрактометра.

Для определения межплоскостного расстояния  $d$  ( $h$ ,  $k$ ,  $l$ ) применяли формулу Вульфа-Брэгга [18] (1):

$$d = \lambda / 2 \sin \theta \quad (1)$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $\theta$  – угол скольжения.

Оценка размеров малых частиц (кристаллов) произведена по формуле Шеррера [19] (2):

$$D = \lambda / \beta \cos \theta \quad (2)$$

где  $\beta$  – уширение дифракционных линий, вычисляемое как разность между шириной линии и шириной крупнокристаллического стандарта (кварц).

Каждой линии соответствует свое направление в кристаллитах, поэтому различие величин оценок размеров, скорее всего, указывает на анизотричность кристаллитов.

Затем рассчитывалась степень кристалличности (СК), которая рассчитывается по формуле (3):

$$СК = I_{\text{крист}} / (I_{\text{крист}} + I_{\text{аморфн}}) \quad (3)$$

где  $I_{\text{крист}}$  – общая площадь максимумов кристаллической фазы;  $I_{\text{аморфн}}$  – общая площадь дифракционного рассеяния аморфной фазы.

Рентгенофлуоресцентный анализ мальтодекстрина, полученного при кислотном и ферментном гидролизе картофельного и кукурузного крахмала, проводился при излучении 25 кэВ дифрактометра ДИФРЕЙ-401 с энергодисперсионным детектором АМРТЕК. При таком облучении веществ происходит ионизация глубинных уровней атомов элементов, входящих в вещество, и возбуждаются электронные переходы на освободившиеся уровни. В случае легких элементов это, как правило, переходы К-серии, сопровождающиеся возникновением пары спектральных

рентгенофлуоресценционных линий К- $\alpha$  и К- $\beta$ : при переходах соответственно с уровня 2р ( $\alpha$ -линия) и 3р ( $\beta$ -линия) на 1s. Вследствие большей удаленности 3р-электронов от ядра атома и экранирования их нижележащими электронными уровнями переходы с 3р уровня на 1s менее вероятны, и  $\beta$ -линия слабее  $\alpha$ -линии в 4–5 раз [20].

## Результаты и обсуждения

На первых этапах исследования рассмотрены дифрактограммы картофельного (№ 1) и кукурузного (№ 2) крахмалов. Данные дифрактограммы картофельного и кукурузного крахмала указывают на структурные различия (рисунок 1). Большая часть структурно организованных цепочек с некоторыми отличиями уложены в слои с межплоскостными расстояниями в интервале 3.9–5.8 Å, кроме этого, в кукурузном крахмале выделяется также периодичность на уровне 15.8 Å (5.6°). Однако значительная часть вещества представляет собой рентгеноаморфное состояние, характеризующееся сильным рассеянием в области 15–25°. На рисунке 1 представлены результаты исследования дифрактометрического анализа образцов картофельного (№ 1) и кукурузного (№ 2) крахмала и образцов мальтодекстрина, полученных при ферментном гидролизе картофельного крахмала (№ 3) и кукурузного крахмала (№ 4).

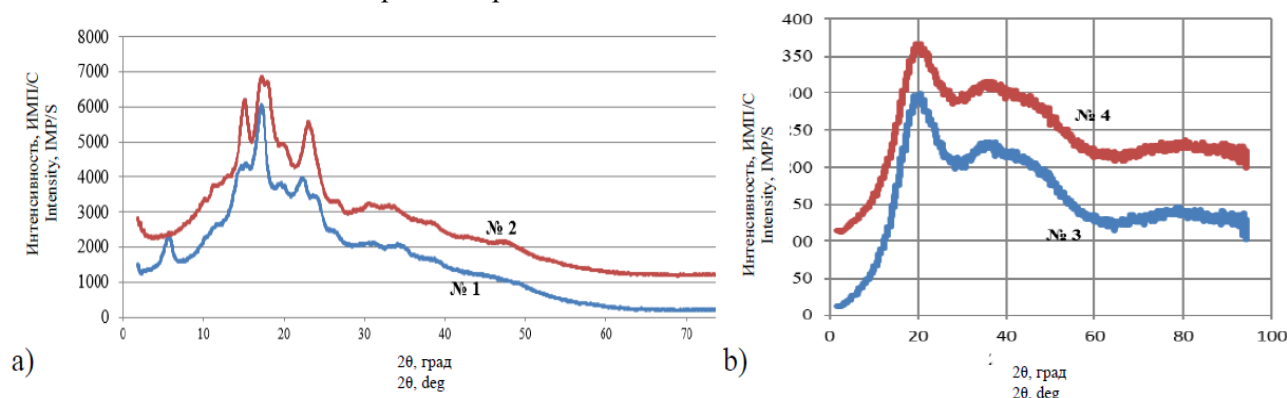


Рисунок 1. Дифрактограммы: а) картофельного (№ 1) и кукурузного (№ 2) крахмала; б) ферментный гидролиз картофельного крахмала (№ 3) и ферментный гидролиз кукурузного крахмала (№ 4) до множенные на  $\sin \theta$

Figure 1. Diffractograms: a) potato (No. 1) and corn (No. 2) starch; b) ferment hydrolysis of potato starch (No. 3) and enzyme hydrolysis of corn starch (No. 4) multiplied by  $\sin \theta$

Исходя из результатов дифрактометрического анализа образцы мальтодекстрина, полученные при ферментном гидролизе картофельного и кукурузного крахмала, имеют схожую аморфную структуру с крахмалом и с окристаллизованной целлюлозой в рентгеновских лучах, на которой выделяется широкий и довольно интенсивный максимум в области 18–19°. Также имеются менее оформленные более слабые максимумы,

которые выделены в специальных координатах (рисунок 1). Причем оба образца (№ 3 и № 4) имеют схожие дифракционные картины, вид которых в значительной мере определяется комплексом межатомных расстояний, которые очень близки у моно-, ди- и полисахаридам, так как в основе этих аморфных структур одно и то же вещество – глюкоза.

Результаты дифрактометрического анализа мальтодекстрина, полученного при кислотном гидролизе картофельного (№ 5) и кукурузного (№ 6) крахмала и сравнительные дифрактограммы

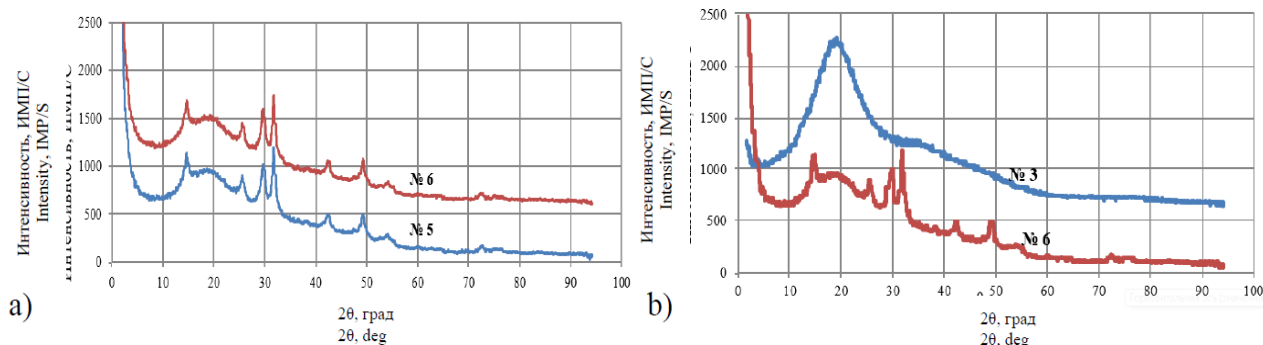


Рисунок 2. Дифрактограммы мальтодекстрина: а) № 5 (кислотный гидролиз картофельного крахмала) и № 6 (кислотный гидролиз кукурузного крахмала); б) № 3 (ферментный гидролиз картофельного крахмала) и № 6 (кислотный гидролиз кукурузного крахмала)

Figure 2. Maltodextrin diffractograms: a) No. 5 (acid hydrolysis of potato starch) and No. 6 (acid hydrolysis of corn starch); b) No. 3 (enzyme hydrolysis of potato starch) and No. 6 (acid hydrolysis of corn starch)

Мальтодекстрины, полученные при кислотном гидролизе крахмала являются частично окристаллизованными, и также в высшей степени сходны между собой, несмотря на разное происхождение (рисунок 2).

Если полагать, что в результате гидролиза в обоих случаях происходит разложение крахмала до моно- и дисахаридов, возникает вопрос, почему при выделении твердого и сухого продукта, осуществляемом одинаковым методом и образом, формирование твердой фазы приводит к различной структурной организации твердой фазы.

Одной из причин этого является различный состав конечного продукта, другой – различный состав самой среды, из которой осуществляется «кристаллизация». В результате, в одном случае достигается лишь частичная и очень ограниченная взаимная сориентированность, в другом хотя бы часть вещества представлена небольшими областями, в которых молекулы довольно регулярным образом укладываются в кристаллическую решетку.

Исходя из результатов дифрактометрического анализа произвести оценку СК образцов мальтодекстрина, полученных методом ферментного гидролиза картофельного и кукурузного крахмала невозможно, так как данные образцы имеют аморфную структуру. Для других образцов мальтодекстрина, полученных кислотным гидролизом картофельного и кукурузного крахмала, была возможность определения СК, так как дифрактограммы показали частичную кристаллизацию (рисунок 2). Определение СК осуществлялось для № 5. Для этого необходимо осуществить отсечение аморфной структуры для определения интенсивности (площади) кристаллических максимумов и оценки размера

мальтодекстрина, полученного при ферментном гидролизе картофельного крахмала – № 3 и при кислотном гидролизе кукурузного крахмала – № 6 представлены на рисунке 2.

кристаллитов. После отсечения фона определены дифракционные углы линий кристаллической фазы, соответствующие им межплоскостные расстояния, оценены размеры кристаллитов (таблица 1). Каждой линии соответствует свое направление в кристаллитах, поэтому различие величин оценок размеров указывают на анизометричность кристаллитов. Суммарная площадь максимумов кристаллической фазы составляет 1193 у. е., общая площадь под кривой дифракционного рассеяния (кристаллического и аморфного), определенная аналогично площадям для кристаллических максимумов – 4240 у. е., отсюда оценка СК равна всего 28%.

Таблица 1.  
Дифракционные углы ( $2\theta$ ), межплоскостные расстояния ( $d$ ), площадь дифракционных максимумов ( $S$ ) и оценка размера ( $D$ ) кристаллической фазы № 5

Table 1.  
Diffraction angles ( $2\theta$ ), interplane distances ( $d$ ), area of diffraction maxima ( $S$ ) and size estimation ( $D$ ) of crystal phase No. 5

$2\theta, ^\circ$	$d, \text{\AA}$	$S, \text{y. e.}$	$D, \text{nm}$
17,78	5,99	173	9
25,58	3,483	95	13
29,61	3,017	243	11
31,79	2,814	331	14
42,29	2,137	89	9
49,25	1,850	146	12
53,92	1,700	80	–
72,71	1,301	36	8

На рисунке 3 представлена сравнительная дифрактограмма мальтодекстрина (№ 3), полученного при ферментном расщеплении картофельного крахмала, и приобретенного мальтодекстрина «MultyDex Sun Premium» (№ 7).



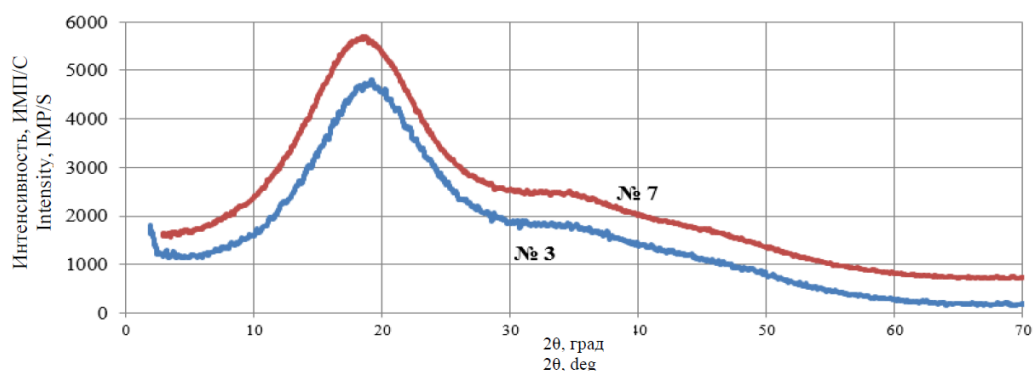


Рисунок 3. Дифрактограммы мальтодекстрина ферментного гидролиза картофельного крахмала (№ 3) и мальтодекстрина «MultyDex Sun Premium» (№ 7)

Figure 3. Diffractograms of maltodextrin of enzymatic hydrolysis of potato starch (No. 3) and maltodextrin "MultyDex Sun Premium" (No. 7)

Также в ходе исследования дифракционного анализа рассматривался мальтодекстрин марки «MultyDex Sun Premium» (№ 7). Дифрактограмма, представленная на рисунке 3, говорит о том, что приобретенный мальтодекстрин также имеет аморфное состояние. Аморфная структура мальтодекстрина немного отличается по дифракционной картине от продуктов ферментного гидролиза крахмалов тем, что главный максимум расположен

в меньших углах – примерно на  $18.5^\circ$  против  $19.1^\circ$  (рисунок 2 и 3), но, по-видимому, более близка к продуктам кислотного гидролиза, у которых главный максимум также около  $18.5^\circ$ .

На рисунке 4 представлены результаты рентгенофлуоресцентного анализа образцов мальтодекстрина, полученных при ферментном (№ 3 и № 4) и кислотном (№ 5 и № 6) расщеплении картофельного и кукурузного крахмала.

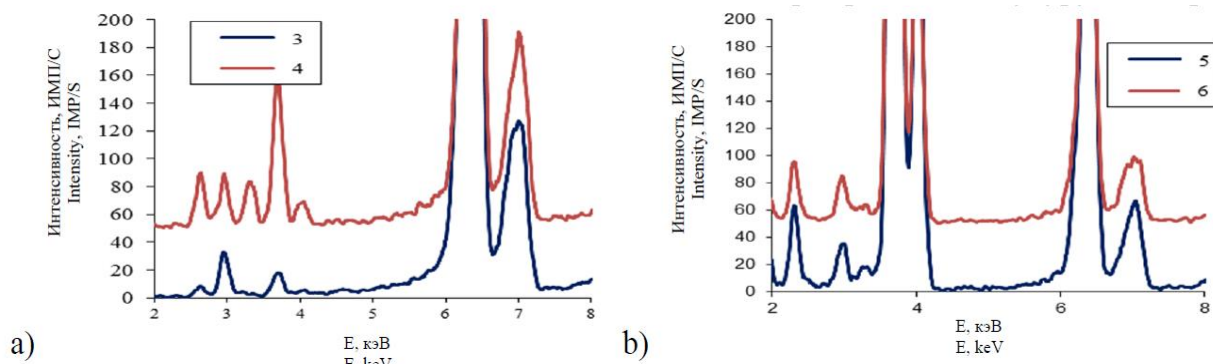


Рисунок 4. Рентгенофлуоресцентные спектры мальтодекстрина: а) ферментного гидролиза картофельного (№ 3) и кукурузного (№ 4) крахмалов и б) кислотного гидролиза картофельного (№ 5) и кукурузного (№ 6) крахмалов

Figure 4. X-ray fluorescence spectra of maltodextrin: a) enzymatic hydrolysis of potato (#3) and maize (#4) starches and b) acid hydrolysis of potato (#5) and maize (#6) starches

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа образцы мальтодекстрина резко различаются содержанием кальция (3.69 и 4.01 кэВ, рисунок 4). В больших количествах данный элемент обнаружен у мальтодекстрина, полученного при кислотном гидролизе крахмалов (№ 5 и № 6, рисунок 4), в то время как мальтодекстрины, полученные при ферментном гидролизе крахмалов (№ 3 и № 4, рисунок 4), имеют незначительное количество кальция.

Что касается линий железа (6.40 и 7.06 кэВ) то, этот результат относительно слабого рассеяния образцами излучения используемой в аппарате рентгеновской трубки с железным анодом.

В органических образцах мальтодекстрина № 3 и 4, полученных ферментным гидролизом, линии железа не являются слабыми на фоне линий аргона и слабых линий фактически примесных элементов (Cl, K, Ca) нет.

При кислотном гидролизе крахмала обнаружена сера (2.31 и 2.46 кэВ) при равном с кальцием молярном содержании, так как дает слабые линии, чем кальций (рисунок 4 (b)). В образцах мальтодекстрина ферментного гидролиза картофельного и кукурузного крахмала (№ 3 и № 4, № 9) сера не обнаруживается, но можно отметить наличие хлора (2.62 и 2.82 кэВ), причем в образцах мальтодекстрина, полученных

из кукурузного крахмала его в несколько раз больше, чем в образцах мальтодекстрина, полученных из картофельного крахмала (рисунок 4 (а)), при этом соотношение интенсивностей линий хлора и кальция сопоставимо, из чего можно сделать предположение о присутствии этих элементов в форме хлорида кальция. Также небольшое содержание калия (3.31 и 3.59 кэВ) характерно для мальтодекстрина полученного из кукурузного крахмала.

### Заключение

Рентгенодифракционный анализ оказался информационным методом для технологического производства мальтодекстрина, так как данный метод позволил выявить присутствие различных примесей и установить, какой из двух представленных методов гидролиза крахмалов является более безопасным для пищевой промышленности.

По результатам дифрактограмм видно, что образцы мальтодекстрина полученные методом ферментного гидролиза имеют аморфную структуру, также имеют схожие дифракционные картины, вид которых определяется комплексом межатомных расстояний очень близких к моно-, ди- и полисахаридам. Также дифрактограммы мальтодекстрина ферментного расщепления

крахмалов имеет абсолютное сходство с приобретенным мальтодекстрином марки «MultyDex Sun Premium», следовательно, данный мальтодекстрин получали методом ферментного расщепления. С помощью рентгенофлуоресцентного анализа установлены наличие примесей, которые содержались в мальтодекстрине ферментного и кислотного гидролиза. Так, в образцах мальтодекстрина ферментного гидролиза картофельного и кукурузного крахмала содержание кальция обнаружено незначительное количество (3.69 кэВ), в то время как в образцах мальтодекстрина кислотного гидролиза картофельного и кукурузного крахмала содержание кальция имеется в большем количестве (4.01 кэВ). Следовательно, степень очистки конечных продуктов при кислотном расщеплении крахмалов является достаточно слабой. Присутствие серы в образцах мальтодекстрина, полученных при ферментном расщеплении крахмала не обнаружено, но есть следы хлора (2.62 и 2.82 кэВ) и калия (3.31 и 3.59 кэВ) в образцах мальтодекстрина, полученного при ферментном гидролизе кукурузного крахмала.

### Благодарности

Работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «Инструментальные методы анализа в области прикладной биотехнологии» на базе КемГУ.

### Литература

1. Iakovchenko N.V., Arseneva T.P. Tapioca maltodextrin in the production of soft unripened cheese // *Acta Sci Pol Technol Aliment*. 2016. P. 47–56.
2. Toraya-Aviles R., Segura-Campos M., Chel-Guerrero L. Some nutritional characteristics of enzymatically resistant maltodextrin from cassava (*manihot esculenta crantz*) starch // *Plant Foods Hum Nutr*. 2017. P. 149–155.
3. Abd Ghani A., Adachi S., Shiga H. Effect of different dextrose equivalents of maltodextrin on oxidation stability in encapsulated fish oil by spray drying // *Biosci Biotechnol Biochem*. 2017. P. 705–711.
4. Haghighat-Kharazi S., Kasaai M.R., Milani J.M. Optimization of encapsulation of maltogenic amylase into a mixture of maltodextrin and beeswax and its application in gluten-free bread // *J Texture Stud*. 2020. P. 631–641.
5. Федорова А.М., Милентьева И.С. Экономическое обоснование использования мальтодекстринов для молочной промышленности // *Все о мясе*. 2020. С. 374–378.
6. Федорова А.М., Милентьева И.С. Исследование влияния процесса сушки для производства мальтодекстрина // *Инновационные технологии пищевых производств. сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2020. С. 56–58.
7. Федорова А.М., Веснина А.Д., Чекушкина Д.Ю. Разработка технологии получения биологически активной добавки мальтодекстрина и изучение его свойств // *Инновационный конвент «Образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра «Кузбасс»»*. 2019. С. 171–174.
8. Федорова А.М., Величкович Н.С., Милентьева И.С. Мальтодекстрины из крахмалосодержащего сырья и крахмала // *Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации"*. 2019. С. 229–232.
9. Федорова А.М., Милентьева И.С. Подбор параметров гидролиза крахмалосодержащего сырья // *Инновации в пищевой биотехнологии: сборник тезисов VII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2019. С. 86–88.
10. Ademosun A.O. Glycemic properties of Soursop-based ice cream enriched with Moringa leaf powder // *Foods and Raw Materials*. 2021. P. 207–214.
11. Bredihin S.A., Andreev V.N., Martekha A.N. Erosion potential of ultrasonic food processing // *Foods and Raw Materials*. 2021. P. 335–344.
12. Grujic R., Cvjetkovic V.G., Marjanovic-Balaban Ž. Separation of gliadins from wheat flour by capillary gel electrophoresis: optimal conditions // *Foods and Raw Materials*. 2020. P. 411–421.
13. Jendrzejewska I. Application of X-Ray Powder Diffraction for Analysis of Selected Dietary Supplements Containing Magnesium and Calcium // *Front Chem*. 2020. P. 672.


14. Jendrzewska I., Zajdel P., Pietrasik E., Barsova Z., Goryczka T. Application of X-ray powder diffraction and differential scanning calorimetry for identification of counterfeit drugs // *Monatsh Chem.* 2018. P. 977–985.
15. Takegami K., Hayashi H., Okino H., Kimoto N. et al. Estimation of identification limit for a small-type OSL dosimeter on the medical images by measurement of X-ray spectra // *Radiol Phys Technol.* 2016. P. 286–92.
16. Dilanian R.A., Darmanin C., Varghese J.N., Wilkins S.W. et al. A new approach for structure analysis of two-dimensional membrane protein crystals using X-ray powder diffraction data // *Protein Sci.* 2011. P. 457–64.
17. Федорова А.М., Козлова О.В., Славянский А.А. Исследование и разработка технологии получения мальтодекстринов для молочной промышленности // *Техника и технология пищевых производств.* 2020. С. 616–629.
18. Shustov D.B., Baydakova M.V., Val'kovskiy G.A., Yagovkina M.A. Rentgenovskaya difraktometriya polikristalov [X-ray diffractometry of polycrystals]. St. Petersburg: Methodological guidelines for laboratory work on the diagnosis of materials, 2011. P. 25.
19. Hayashi K., Happon N., Hosokawa S. X-ray fluorescence holography // *J Phys Condens Matter.* 2012. P. 093201.
20. Винокуров А.Ю., Коптелова Е.К., Лукин Н.Д. Морфологические, структурные и реологические свойства катионированного в водной суспензии крахмала // *Вестник технологического университета.* 2015. С. 135–140.

## References


1. Iakovchenko N.V., Arseneva T.P. Tapioca maltodextrin in the production of soft unripened cheese. *Acta Sci Pol Technol Aliment.* 2016. pp. 47–56.
2. Toraya-Aviles R., Segura-Campos M., Chel-Guerrero L. Some nutritional characteristics of enzymatically resistant maltodextrin from cassava (*manihot esculenta crantz*) starch. *Plant Foods Hum Nutr.* 2017. pp. 149–155.
3. Abd Ghani A., Adachi S., Shiga H. Effect of different dextrose equivalents of maltodextrin on oxidation stability in encapsulated fish oil by spray drying. *Biosci Biotechnol Biochem.* 2017. pp. 705–711.
4. Haghighat-Kharazi S., Kasaai M.R., Milani J.M. Optimization of encapsulation of maltogenic amylase into a mixture of maltodextrin and beeswax and its application in gluten-free bread. *J Texture Stud.* 2020. pp. 631–641.
5. Fedorova A.M., Milentyeva I.S. Economic justification of the use of maltodextrins for the dairy industry. All about meat. 2020. pp. 374–378. (in Russian).
6. Fedorova A.M., Milentyeva I.S. Investigation of the influence of the drying process for the production of maltodextrin // *Innovative technologies of food production. collection of abstracts of the II All-Russian Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists.* 2020. pp. 56–58. (in Russian).
7. Fedorova A.M., Vesnina A.D., Chekushkina D.Yu. Development of technology for obtaining a biologically active additive maltodextrin and the study of its properties. *Innovation Convention "Education, Science, innovation. Youth contribution to the development of the scientific and educational center "Kuzbass"."* 2019. pp. 171–174. (in Russian).
8. Fedorova A.M., Velichkovich N.S., Milentva I.S. Maltodextrins from starch-containing raw materials and starch. *The Innovation Convention "Kuzbass: education, science, innovation"."* 2019. pp. 229–232.
9. Fedorova A.M., Milentyeva I.S. Selection of parameters of hydrolysis of starch-containing raw materials. *Innovations in food biotechnology. collection of abstracts of the VII International Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists.* 2019. pp. 86–88. (in Russian).
10. Ademosun A.O. Glycemic properties of Soursop-based ice cream enriched with Moringa leaf powder. *Foods and Raw Materials.* 2021. pp. 207–214.
11. Bredihin S.A., Andreev V.N., Martekha A.N. Erosion potential of ultrasonic food processing. *Foods and Raw Materials.* 2021. pp. 335–344.
12. Grujic R., Cvjetkovic V.G., Marjanovic-Balaban Ž. Separation of gliadins from wheat flour by capillary gel electrophoresis: optimal conditions. *Foods and Raw Materials.* 2020. pp. 411–421.
13. Jendrzewska I. Application of X-Ray Powder Diffraction for Analysis of Selected Dietary Supplements Containing Magnesium and Calcium. *Front Chem.* 2020. pp 672.
14. Jendrzewska I., Zajdel P., Pietrasik E., Barsova Z., Goryczka T. Application of X-ray powder diffraction and differential scanning calorimetry for identification of counterfeit drugs. *Monatsh Chem.* 2018. pp 977–985.
15. Takegami K., Hayashi H., Okino H., Kimoto N. et al. Estimation of identification limit for a small-type OSL dosimeter on the medical images by measurement of X-ray spectra. *Radiol Phys Technol.* 2016. pp 286–92.
16. Dilanian R.A., Darmanin C., Varghese J.N., Wilkins S.W. et al. A new approach for structure analysis of two-dimensional membrane protein crystals using X-ray powder diffraction data. *Protein Sci.* 2011. pp 457–64.
17. Fedorova A.M., Kozlova O.V., Slavyansky A.A. Research and development of technology for obtaining maltodextrins for the dairy industry. *Technique and technology of food production.* 2020. pp. 616–629. (in Russian).
18. Shustov D.B., Baydakova M.V., Val'kovskiy G.A., Yagovkina M.A. Rentgenovskaya difraktometriya polikristalov [X-ray diffractometry of polycrystals]. St. Petersburg, Methodological guidelines for laboratory work on the diagnosis of materials, 2011. pp 25.
19. Hayashi K., Happon N., Hosokawa S. X-ray fluorescence holography. *J Phys Condens Matter.* 2012. pp. 093201.
20. Vinokurov A. Yu., Koptelova E.K., Lukin N.D. Morphological, structural and rheological properties of starch cated in aqueous suspension. *Bulletin of the Technological University.* 2015. pp. 135–140. (in Russian).

## Сведения об авторах


**Анастасия М. Федорова** младший научный сотрудник, кафедра бионанотехнология, Кемеровский государственный университет, Б-р Строителей, 47, г. Кемерово, 650000, Россия, anastasija.fedorova-af2014@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8071-4411>


**Дмитрий М. Руссаков** зав. лаборатории, лаборатория электронной микроскопии, кафедра экспериментальной физики, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, dm.russakov@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5170-7530>

**Ирина С. Милентьева** д.т.н., доцент, кафедра бионанотехнология, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, irazumnikova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3536-562X>

**Анна В. Позднякова** к.т.н., доцент, кафедра бионанотехнологии, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, anjap12@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6854-0850>

**Ольга Г. Альтшулер** д.х.н., Лаборатория супрамолекулярной химии полимеров, Кемеровский государственный университет, ул. Красная, 6, г. Кемерово, 650000, Россия, alt\_og@bk

## Вклад авторов

**Анастасия М. Федорова** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент

**Дмитрий М. Руссаков** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провёл эксперимент

**Ирина С. Милентьева** консультация в ходе исследования

**Анна В. Позднякова** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат


**Ольга Г. Альтшулер** выполнил расчёты

## Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about authors


**Anastasia M. Fedorova** junior researcher, Department of Bionanotechnology, Kemerovo State University, B-r Stroiteley, 47, Kemerovo, 650000, Russia, anastasija.fedorova-af2014@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8071-4411>


**Dmitry M. Russakov** head of the laboratory, Laboratory of Electron Microscopy, Department of Experimental Physics, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, dm.russakov@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0001-5170-7530>

**Irina S. Milentyeva** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bionanotechnology, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, irazumnikova@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3536-562X>

**Anna V. Pozdnyakova** Cand. Sci. (Engin.), associate Professor, Department of Bionanotechnology, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, anjap12@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-6854-0850>

**Olga G. Altshuler** Dr. Sci. (Chem.), Laboratory of Supramolecular Chemistry of Polymers, Kemerovo State University, Krasnaya str., 6, Kemerovo, 650000, Russia, alt\_og@bk

## Contribution

**Anastasia M. Fedorova** review of literature sources on the problem under study, conducted an experiment

**Dmitry M. Russakov** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Irina S. Milentyeva** consultation during the study

**Anna V. Pozdnyakova** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

**Olga G. Altshuler** performed calculations

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/12/2022	После редакции 12/01/2023	Принята в печать 22/01/2023
Received 20/12/2022	Accepted in revised 12/01/2023	Accepted 22/01/2023