

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.425-433>
УДК 577.15:664.2



Ферментативный гидролиз экструдированного кукурузного крахмала в условиях высокой концентрации среды

© 2020. А. Ю. Шариков✉, М. В. Амелякина, В. В. Иванов,
Д. В. Поливановская

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», г. Москва, Российская Федерация

Одним из направлений технологического развития процессов биоконверсии крахмалсодержащего сырья в пищевой промышленности является повышение концентраций перерабатываемых жидких сред, что способствует снижению операционных издержек, тепло- и энергозатрат и повышает эффективность использования емкостного оборудования. Перспективным является внедрение в процессы биоконверсии термопластической экструзии как стадии предподготовки, обеспечивающей интенсивную клейстеризацию крахмала при влажосодержании 15-30 %, что стало предпосылкой к разработке экструзионно-гидролитической технологии получения концентрированных гидролизатов крахмалсодержащего сырья. В рамках развития технологии проведены исследования влияния основных факторов биокатализа на образование продуктов гидролиза и реологические свойства высококонцентрированных гидролизатов экструдатов кукурузного крахмала. В качестве исследуемых управляющих факторов были приняты дозировка термостабильной α -амилазы и концентрация среды. Уровни варьирования факторами были установлены в интервале 5-13 ед. АС/г крахмала, концентрация сухих веществ 40-60 % в соответствии с планом центрального ортогонального композиционного планирования эксперимента. Значение декстрозного эквивалента в области исследуемого факторного пространства изменялось от 23 до 40, динамическая вязкость от 89 до 2219 мПа·с. Анализ результатов и математической модели показал, что увеличению декстрозного эквивалента в продуктах гидролиза способствует снижение концентрации среды и повышение дозировки α -амилазы, при этом динамика прироста значения декстрозного эквивалента падает с превышением дозировки ферментного препарата 9 ед. АС/г крахмала. Реологические исследования показали, что дозировка α -амилазы 1-13 ед. АС/г крахмала при 40 % концентрации среды обеспечивает достаточные для последующих стадий переработки гидролизата значения динамической вязкости 89-780 мПа·с. Увеличение концентрации до 50-60 % требует внесения α -амилазы более 5 ед. АС/г крахмала для обеспечения реологически безопасного технологического процесса.

Ключевые слова: экструдирование, крахмал, мальтодекстрин, фермент, гидролиз, высокие концентрации, математическая модель

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи» (тема № 0529-2019-0066).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шариков А. Ю., Амелякина М. В., Иванов В. В., Поливановская Д. В. Ферментативный гидролиз экструдированного кукурузного крахмала в условиях высокой концентрации среды. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(4):425-433. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.425-433>

Поступила: 23.04.2020

Принята к публикации: 18.06.2020

Опубликована онлайн: 24.08.2020

Enzymatic hydrolysis of high gravity extruded corn starch media

© 2020. Anton Yu. Sharikov✉, Mariya V. Amelyakina, Viktor V. Ivanov,
Dar'ya V. Polivanovskaya

Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

Increase of solubles concentration in processable liquid media is one of the trends of technological development of starchy materials bioconversion. It promotes the reduction in operating costs, in heat and energy consumption and increases the efficiency of using capacitive equipment. The use of thermoplastic extrusion in the bioconversion processes as a pre-

treatment stage is perspective. Extrusion provides intensive gelatinization of starch with a moisture content of 15-30 % that has become a prerequisite for the development of extrusion-hydrolytic technology for obtaining of concentrated hydrolysates from starch-containing raw materials. As a part of the technology development, the effect of the key factors of biocatalysis on the formation of hydrolysis products and the rheological properties of highly concentrated hydrolysates of corn starch has been studied. The dosage of thermostable α -amylase and the concentration of the medium were taken as independent variables. The ranges of variation of the factors were set in the range of 5-13 units of amylolytic activity per 1 g of starch and 40-60 % soluble concentration in accordance with the central orthogonal second-order design of the experiment. The value of dextrose equivalent in the area of the studied factor space varied from 23 to 40. Dynamic viscosity values were in the range from 89 to 2219 mPa-s. The analysis of the results and the mathematical model showed that an increase in the dextrose equivalent in the hydrolysis products was facilitated by a decrease of the concentration of the medium and an increase in the dosage of α -amylase. The growth dynamics of the dextrose equivalent value decreased with an excess of the dosage of the enzyme preparation of 9 units of amylolytic activity per 1 g of starch. Rheological studies have shown that a dosage of α -amylase of 1-13 units of amylolytic activity per gram of starch at 40 % concentration of the medium provided dynamic viscosity values in the range 89-780 mPa-s, which is sufficient for the subsequent stages of hydrolyzate processing. Increasing the concentration to 50-60 % requires the introduction of α -amylase at a dosage of more than 5 units of amylolytic activity to ensure a rheologically safe process.

Keywords: extrusion, starch, maltodextrin, enzyme, hydrolysis, high concentrations, mathematical model

Acknowledgement: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (theme No. 0529-2019-0066).

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Sharikov A. Yu., Amelyakina M. V., Ivanov V. V., Polivanovskaya D. V. Enzymatic hydrolysis of high gravity extruded corn starch media. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(4):425-433. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.4.425-433>

Received: 23.04.2020

Accepted for publication: 18.06.2020

Published online: 24.08.2020

Крахмалсодержащее сельскохозяйственное сырье является важной составляющей рациона питания человека. Кроме того, продукты химической и ферментативной модификации крахмала широко используются как функциональные и пищевкусовые добавки в пищевой промышленности в виде гидролизатов, глюкозных сиропов, фруктозы, мальто- и циклодекстринов, модифицированных крахмалов.

Ферментативный гидролиз крахмала включает три этапа: клейстеризацию, разжижение и осахаривание амилолитическими ферментными препаратами. Клейстеризация необходима для повышения доступности субстрата действию ферментов и ускорения процесса гидролиза [1, 2]. Во время разжижения с использованием α -амилазы вязкость реакционной смеси снижается, и клейстеризованный крахмал частично гидролизуетсся с образованием продуктов с декстрозным эквивалентом, который варьирует в диапазоне от 15 до 30. Во время осахаривания частично гидролизованные крахмальные цепи расщепляются на глюкозу, мальтозу, мальтотриозу, и некоторые высшие олигомеры. Декстрозный эквивалент получаемого продукта варьируется от 40 до 98 в зависимости от используемого фермента [3].

Значительное место в валовом объеме продуктов ферментативной модификации крахмала занимают мальтодекстрины, выполняющие роль нейтральных носителей вкусовых

добавок, наполнителей и углеводных компонентов, регуляторов реологических свойств и сладости, заменителей жира.

В промышленности клейстеризацию и разжижение часто проводят одновременно, добавляя термостабильную α -амилазу к суспензии крахмала перед клейстеризацией с использованием трубчатых разварников [2, 4]. Концентрация крахмала во время этого процесса ограничена 30-35 % [4], ввиду усложнения реологических условий перемещения крахмалистых сред в системах разваривания и технологических трубопроводов. По разработанным технологиям получения мальтодекстринов из кукурузной муки или кукурузного крахмала процесс получения гидролизата крахмала ведут в несколько стадий путем 40 минутной термической обработки при температуре 90-95 °C в присутствии термостабильного ферментного препарата α -амилазы и последующей обработкой при повышенной температуре 105 °C в течение 10 мин [5]. Последовательно осуществляют вторую стадию декстринизации суспензии при температуре 95 °C в течение 60-120 мин. Для увеличения производительности по готовому продукту проводят процесс упаривания на выпарном аппарате для повышения концентрации сухих веществ в полученном гидролизате до уровня 45-50 % с сохранением необходимого показателя вязкости для распылительной сушки получаемого

продукта [6]. В результате исследований [7] по получению сиропа мальтодекстрина из пшеничной муки были установлены оптимальные значения факторов процесса разжижения: концентрация суспензии муки не более 24,4 %, дозировка α -амилазы – 0,5 ед. АС/г, продолжительность гидролиза не менее 62 мин.

Анализируя технологические процессы существующих технологий получения мальтодекстринов, следует отметить основные недостатки: многостадийность процесса; продолжительность; невозможность получения высоких концентраций гидролизатов крахмалистого сырья в связи с резким повышением их вязкости, что снижает производительность используемого оборудования и требует дополнительных операций и материальных затрат по повышению их концентрации. Вместе с тем, повышение концентрации крахмала в суспензии в процессе клейстеризации и ферментативного гидролиза потенциально позволяет повысить производственную мощность [4], обеспечить стабильность фермента [8], снизить затраты тепло- и электроэнергии [9].

Альтернативным способом клейстеризации и гидролиза крахмала является использование термопластической экструзии как стадии предподготовки сырья или непосредственно биокатализа с использованием экструдера как биореактора [10]. В последнем варианте, в связи с кратким временем обработки, даже при наличии термостабильной α -амилазы эквивалентное значение декстрозного эквивалента экструдатов обычно остается низким, менее 2-5 [11].

При экструзии кукурузного крахмала показано [12], что экструзия при более низком содержании воды усиливает клейстеризацию крахмала, что связано с более высоким напряжением сдвига на участке реверсивных шнековых элементов, соответственно повышенным тепловыделением и механическим разрушением гранул биополимера. Значимый эффект дозирования воды и термостабильной α -амилазы ферментного препарата на степень клейстеризации, растворимость, декстрозный эквивалент экструдатов показан и в работе [13] при экструдировании крахмала саго с концентрацией фермента 1,48-6,52 %, воды 21-38 % и температурой в предматричной зоне 70,0-97,5 °С. Значение декстрозного эквивалента в зависимости от режима варьировало в диапазоне 0,3-10,4, доминирующими продуктами гидро-

лиза были олигосахариды с 3, 5 и 6 единицами глюкозных остатков. Внесение глюкоамилазы [14] в предматричные зоны камеры экструдера с последующей экспозицией в течение 8 часов позволили получить образцы с декстрозным эквивалентом 83-98.

Использование экструзии в вышеприведенных примерах исследований позволяет значительно повысить концентрацию перерабатываемых сред и объединить в одном реакторе стадии клейстеризации и разжижения крахмала в процессе его декстринизации. Но такое совмещение процессов может нести в себе и риски нестабильных режимов работы экструдера, так как сразу несколько факторов влияют на реологическое состояние субстрата в камере. Резкие перепады вязкости могут вызвать нестабильное течение расплава сырья, аварийную остановку и в случае быстрой потери влаги затвердение гидролизованной массы в камере экструдера, что потребует значительных усилий для очистки шнеков, камеры и возвращения оборудования в рабочее состояние.

Альтернативным решением является использование экструдера для стадии клейстеризации крахмала, а гидролиз осуществлять в реакторе, соединенном с экструдером в одну систему [9, 15, 16]. Разработанный экструзионно-гидролитический способ получения гидролизатов [15, 16] основан на принципе инъекции раствора ферментного препарата в область выхода экструдата через отверстия фильтры через специальный гидролитический узел, соединяющий экструдер с трубчатым реактором. Такое техническое решение позволяет значительно повысить концентрацию получаемых гидролизатов крахмала, при этом значительно упростить аппаратно-технологическую схему и интенсифицировать процесс переработки. При этом решается проблема растворения высокопористых гранул экструдатов. Актуальным в контексте разработки отдельных аспектов данной технологии является определение степени влияния некоторых технологических параметров процесса на качественные характеристики продуктов гидролиза.

Цель исследования – изучение процесса гидролиза экструдатов кукурузного крахмала с получением мальтодекстринов в условиях предельно высоких концентраций крахмала, влияния концентрации субстрата в гидролизатах и дозировки ферментного препарата на декстрозный эквивалент конечных продуктов биокатализа.

Материал и методы. Объектом исследования являлся кукурузный крахмал по ГОСТ 32159-2013¹. В качестве биокатализатора использовали термостабильную бактериальную α -амилазу активностью 1900 ед. АС/см³, которую определяли методом количественного определения прогидролизованного в стандартных условиях в течении 10 минут крахмала². За единицу амилолитической активности в ед. АС/см³ принимали количество фермента, которое при температуре 30 °С за 10 мин катализировало гидролиз 1 г крахмала до декстринов различной молекулярной массы, что составляет 30 % крахмала, введенного в реакцию. Количество прогидролизованного крахмала определяли колориметрическим методом по степени окраски остаточного крахмала раствором йода.

Крахмал экструдировали на модернизированном двухшнековом экструдере Werner & Pleiderer Continia-37M с диаметром шнеков 37 мм и относительной длиной зоны экструзии 27 м/м. Температура и давление экструзии составляли 195 °С и 2,8 МПа, скорость враще-

ния шнеков 250 об/мин. Доувлажнение крахмала производили до значения 15 % непосредственно в камере экструдера путем непрерывного дозирования воды штатным насосом в требуемых пропорциях.

Содержание влаги в сырье, гидролизатах и образцах мальтодекстрина определяли гравиметрическим методом³ с использованием анализатора влажности ML-50 (A&D, Япония).

Проведение исследований ферментативного гидролиза экструдатов осуществляли в термостатированной емкости с перемешивающим устройством при частоте перемешивания 150 об/мин, при температуре 90 °С без оптимизации pH, т. е. при естественном pH водной суспензии экструдированного крахмала.

Дизайн исследования был основан на методе ортогонального композиционного планирования эксперимента⁴, в котором в качестве управляющих факторов были приняты концентрация сухих веществ в гидролизате и дозировка термостабильной α -амилазы. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Реальные и кодированные значения управляющих факторов / Table 1 – Real and coded values of controlling factors

Кодированные значения / Coded values	Реальные значения / Real values	
	концентрация сухих веществ, % / solubles concentration, %	дозировка α -амилазы, ед. АС/г крахмала / dosage of α -amylase, units of amylolytic activity per 1 g of starch
- α	40,0	5
-1	40,0	5
0	50,0	9
1	60,0	13
A	60,0	13

Выходными параметрами являлись декстрозный эквивалент высушенного гидролизата и динамическая вязкость гидролизата по истечении 1 часа гидролиза.

Сушка полученных гидролизатов осуществлялась в термостатированном шкафу до влажности 4-5% с последующим измель-

чением. Декстрозный эквивалент определяли по ГОСТ Р 50549-93⁵. Анализ реологических свойств гидролизированных сред проводили методом вибрационной вискозиметрии⁶ с использованием вискозиметра SV-10 (A&D, Япония) на момент окончания гидролиза при температуре 90 °С.

¹ГОСТ 32159-2013. Крахмал кукурузный. Общие технические условия. М.: Стандартинформ. 2013. 12 с.

²ГОСТ Р 54330-2011. Ферментные препараты для пищевой промышленности. Методы определения амилолитической активности (издание 2018 г. с изменениями № 1, 2, поправкой). М.: Стандартинформ, 2018. 22 с.

³ГОСТ Р 55802-2013. Крахмал. Методы определения влаги (Переиздание). М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

⁴Lazic Z. R. Design of Experiments in Chemical Engineering. A Practical Guide. WILEY-VCH Verlag. Weinheim. Germany. 2004. pp. 323-349. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/3527604162>

Исследования проведены в двух повторностях. Достоверность различий средних проводили методом дисперсионного анализа с применением апостериорного анализа по критерию Тьюки при $p < 0,05$ с использованием пакета программ Statistica 6.0. Статистическую обработку результатов измерения, расчет коэффициентов математической модели ортогонального композиционного плана, проверку значимости коэффициентов уравнения по критерию Стьюдента и адекватность модели по критерию Фишера осуществляли с применением программы Scilab 5.5 (Scilab Enterprises, Франция) при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Эксперимент был реализован в соответствии с планом центрального ортогонального композиционного планирования эксперимента для двух факторов. Уровни варьирования факторами были установлены в интервале 5-13 ед. АС/г крахмала для дозировки ферментного препарата, концентрация сухих веществ 40-60 %. Такие концентрации были значительно выше стандартного для гидролиза крахмала содержания сухих веществ 30-35 %. Тем не менее, полученные гидролизаты экструдированного крахмала сохраняли способность к перемешиванию и текучесть, что подтверждается данными вискозиметрии. В таблице 2 представлены результаты реализации ортогонального композиционного плана эксперимента. Результаты эксперимента, дополненные данными по гидролизу в аналогичных условиях при гидролизе ферментным препаратом в дозировке 1 ед. АС/г крахмала сред с концентрацией 40 и 50 % сухих веществ, показали наличие сильной положительной корреляционной связи между дозировкой термостабильной α -амилазы и декстрозным эквивалентом (0,87). В отношении динамической вязкости наблюдались средние положительная (0,61) и отрицательная (-0,46) связи с факторами концентрации среды и дозировки ферментного препарата.

Методом ортогонального композиционного планирования была получена адекватная математическая модель, описывающая зависимость декстрозного эквивалента от дозировки ферментного препарата и концентрации среды:

$$DE = 53,5 - 1,3375 \cdot c + 1,55 \cdot f - 0,04375 \cdot c \cdot f + 0,0153 \cdot c^2 + 0,0977 \cdot f^2,$$

где DE – декстрозный эквивалент, c – концентрация сухих веществ в гидролизате, f – дозировка ферментного препарата, ед. АС/г крахмала.

Таблица 2 – Влияние концентрации среды и дозировки ферментного препарата на образование продуктов гидролиза и динамическую вязкость гидролизата / Table 2 – The effect of the medium concentration and the dosage of the enzyme preparation on the formation of hydrolysis products and the dynamic viscosity of the hydrolysate

Концентрация сухих веществ, % / Solubles concentration, %	Дозировка α -амилазы, ед. АС/г крахмала / Dosage of α -amylase, units of amylolytic activity per 1 g of starch	Декстрозный эквивалент / Dextrose equivalent	Динамическая вязкость, мПа·с / Dynamic viscosity, mPa·s
40	5	27	107
40	9	30	89
40	13	40	110
50	5	23	458
50	9	27	415
50	13	31	335
60	5	26	2219
60	9	27	1752
60	13	32	1105

⁵ГОСТ Р 50549-93 (ИСО 5377-81). Продукты гидролиза крахмала. Определение восстанавливающей способности и эквивалента глюкозы. Метод постоянного титра Лейна и Эйнона. М.: Издательство стандартов, 1993. 11 с.

⁶Sharma H. S. S., Carmichael E., Muhamad M., McCall D., Andrews F., Lyons G., McRoberts W. C., Hornsby P. R. Biorefining of perennial ryegrass for the production of nanofibrillated cellulose. RSC Adv. 2012;2(16):6424-6437. URL: <https://doi.org/10.1039/C2RA20716H>

Данные по результатам гидролиза не позволили получить аналогичные адекватные модели со значимыми коэффициентами для динамической вязкости гидролизатов. Графическая интерпретация полученной

модели представлена на рисунке 1. Характер линий равного уровня показывает, что основное влияние на изменение декстрозного эквивалента оказывает дозировка амилолитического ферментного препарата.

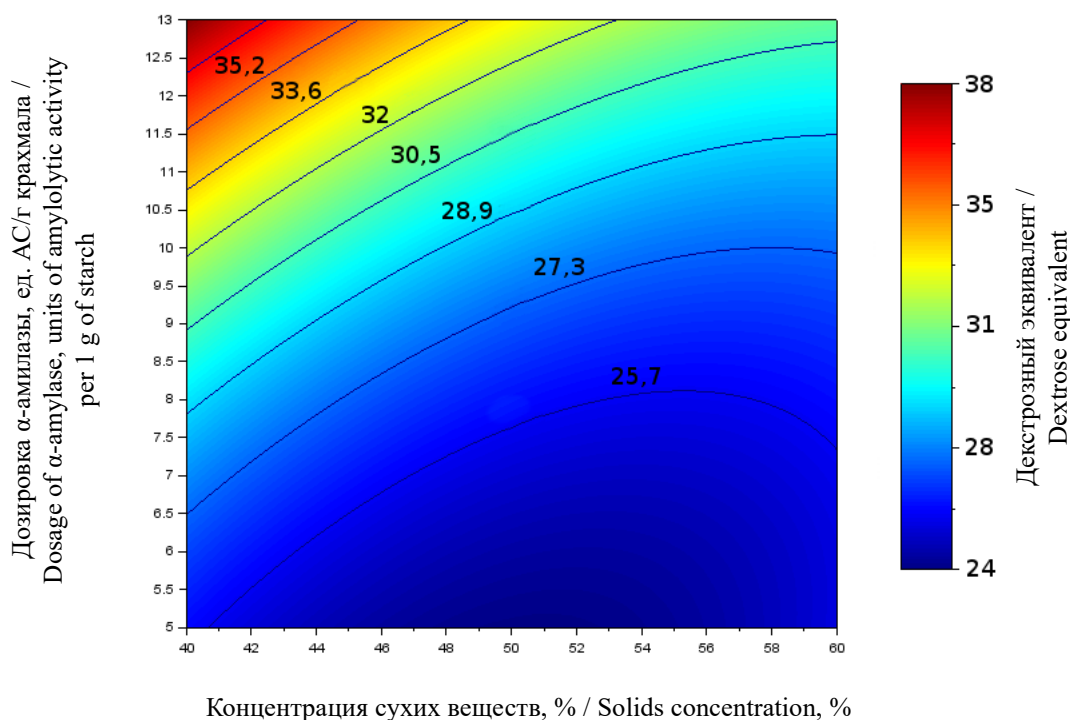


Рис. 1. Декстрозный эквивалент как функция концентрации сухих веществ в гидролизате и дозировки ферментного препарата /

Fig. 1. Dextrose equivalent as a function of the concentration of solubles in the hydrolysate and the dosage of the enzyme preparation

При этом динамика прироста значения декстрозного эквивалента падает с превышением дозировки ферментного препарата 9 ед. АС/г крахмала. Увеличение концентрации среды негативно влияет на значение декстрозного эквивалента, видимо, вследствие менее интенсивного массообмена в условиях повышения вязкости с ростом сухих веществ в гидролизате. При постоянной дозировке фермента с повышением концентрации среды декстрозный эквивалент получаемого продукта из экструдированного крахмала снижался на 10,0-22,5 %.

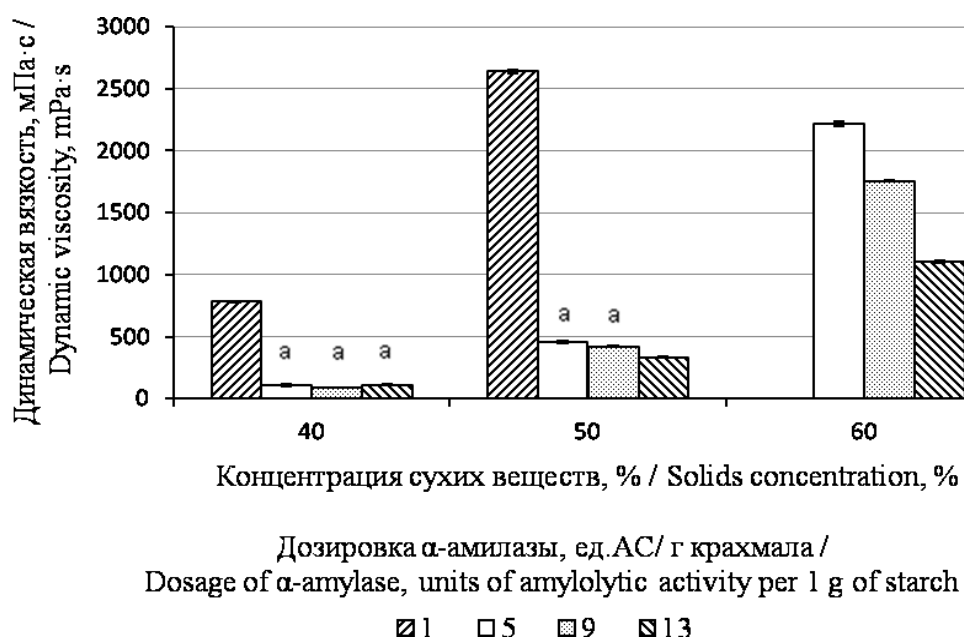
Результаты реологических исследований зависимости динамической вязкости гидролизатов от управляющих факторов биокатализа – концентрации сухих веществ и дозировки амилолитического ферментного препарата, дополненные исследованием образцов, гидролизированных α -амилазой в дозировке 1 ед. АС/г, представлены на рисунке 2. Установлено, что

при концентрации до 50 % дозировка ферментного препарата 1 ед. АС/г не обеспечивает значительного снижения вязкости, а при 60 % (данные не представлены) такого количества биокатализатора недостаточно для формирования гидролизата гомогенной структуры с возможностью перемешивания и перекачивания. При этом стоит отметить, что даже такой низкий уровень внесения α -амилазы обеспечивает получение приемлемой для дальнейшего перекачивания и переработки среды с концентрацией 40 %, что выше стандартных значений для технологии мальтодекстринов 30-35 % сухих веществ. Дальнейшее увеличение дозировки ферментного препарата снижает вязкость с 784 мПа·с до статистически неразличимых для дозировок 5, 9 и 13 ед. АС/г крахмала значений 89-110 мПа·с.

С ростом концентрации среды установлено положительное влияние увеличения

дозировки α -амилазы на снижение вязкости гидролизатов. Повышение дозировки с 1 до 13 ед.

АС/г крахмала при концентрации 50 % обеспечивает снижение вязкости с 2638 до 335 мПа·с.



Значения динамической вязкости статистически не различимы для рядов, обозначенных индексом «а», для каждой группировки по концентрации среды при уровне значимости $p < 0,05$ / Values of dynamic viscosity indicated with the same letter are not significant different for each group of the solubles concentration at $p < 0.05$

Рис. 2. Динамическая вязкость гидролизатов после 1 часа ферментативной обработки / Fig. 2. Dynamic viscosity of hydrolysates after 1 hour of enzymatic treatment

Результатом повышения концентрации среды до 60 % является увеличение вязкости для всех исследуемых сред, даже с высокой дозировкой α -амилазы. При 5 ед. АС вязкость составила 2219 мПа·с, а при 13 ед. АС снизилась до 1105 мПа·с. При этом отмечено, что увеличение концентрации среды до 50 и 60 % делает различие значений динамической вязкости статистически значимым для всех уровней внесения ферментного препарата.

Выводы. Подтверждена возможность получения гидролизатов крахмала кукурузы с концентрацией до 60 %, что в аспекте разработки экструзионно-гидролитической технологии позволяет значительно интенсифицировать процесс получения продуктов биоконверсии крахмала, перейти от многостадийных процессов разваривания, клейстеризации, разжижения к одностадийному процессу получения высококонцентрированных гидролизатов в ре-

акторной системе экструзионно-гидролитической установки.

Получена математическая модель, описывающая зависимость декстрозного эквивалента прогидролизованного экструдированного крахмала от концентрации среды в диапазоне варьирования 40-60 % и дозировки термостабильной α -амилазы в диапазоне 5-13 ед. АС/г крахмала.

Реологическими исследованиями установлено, что дозировке α -амилазы 1-13 ед. АС/г крахмала при 40 % концентрации среды соответствуют относительно низкие значения динамической вязкости, достаточные для перекачивания и перемешивания среды на дальнейших этапах переработки. Увеличение концентрации до 50-60 % требует внесения α -амилазы более 5 ед. АС/г крахмала для обеспечения реологически безопасного технологического процесса.

References

1. Baks T., Bruins M. E., Janssen A. E. M., Boom R. M. Effect of pressure and temperature on the gelatinization of starch at various starch concentrations. *Biomacromolecules*. 2008;9(1):296-304. DOI: <https://doi.org/10.1021/bm700814a>
2. Ananskikh V. V., Shleina L. D., Voronova L. Yu. *Osobennosti fermentativnogo razzhizheniya krakhmala*. [Features of enzymatic starch liquefaction]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2011;(12):77-80. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17109108>
3. Baks T., Bruins M. E., Matser A. M., Janssen A. E. M., Boom R. M. Effect of gelatinization and hydrolysis conditions on the selectivity of starch hydrolysis with α -amylase from *Bacillus licheniformis*. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2008;56(2):488-495. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf072217j>
4. Baks T., Kappen F. H. J., Janssen A. E. M., Boom R. M. Towards an optimal process for gelatinisation and hydrolysis of highly concentrated starch–water mixtures with alpha-amylase from *Licheniformis* B. *Journal of Cereal Science*. 2008;47(2):214-225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.03.011>
5. Ananskikh V. V., Shleina L. D. *O vozmozhnosti polucheniya mal'to-dekstrinov iz kukuruznoy muki*. [About a Possibility of Receiving Maltodextrins from Cornmeal]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2017;(11):9-13. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnosti-polucheniya-maltodekstrinov-iz-kukuruznoy-muki>
6. Ananskikh V. V., Shleina L. D. *Mal'todekstriny iz krakhmalosoderzhashchego syr'ya, ikh kachestvo i ispol'zovanie v otraslyakh pishchevoy promyshlennosti*. [Maltodextrins from starch-containing raw materials, their quality and use in food industries]. *Konditerskoe i khlebopekarnoe proizvodstvo*. 2018;(7-8(177)):50-52. (In Russ.). URL: https://bakery.news/wp-content/uploads/2019/01/Bread_07-08_2018_Maltodekstrin_18_07.pdf
7. Ananskikh V. V., Shleina L. D. *Mal'todekstriny iz krakhmalosoderzhashchego syr'ya*. [Maltodextrins from Starch Containing Raw Materials]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2015;(11):31-34. (In Russ.).
8. Cordt S., Hendrickx M., Maesmans G., Tobback P. The influence of polyalcohols and carbohydrates on the thermostability of α -amylase. *Biotechnology and bioengineering*. 1994;43(2):107-114. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.260430202>
9. Grafelman D. D., Meagher M. M. Liquefaction of starch by a single-screw extruder and post-extrusion static-mixer reactor. *Journal of Food Engineering*. 1995;24(4):529-542. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)90768-7](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)90768-7)
10. Sharikov A. Yu., Stepanov V. I., Ivanov V. V. *Termoplasticheskaya ekstruziya v protsessakh pishchevoy biotekhnologii*. [Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019;9(3 (30)):447-460. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460>
11. Linko P. Extrusion cooking in bioconversions. In *Extrusion Cooking*. Eds. Mercier C., Linko P., Harper J. M. American Association of Cereal Chemists. Inc., St Paul, MN, 1989. pp. 235-245. URL: <https://www.amazon.com/Extrusion-Cooking-C-Mercier/dp/0913250678>
12. Roussel L., Vieille A., Billet I., Cheftel J. C. Sequential heat gelatinization and enzymatic hydrolysis of corn starch in an extrusion reactor optimization for a maximum dextrose equivalent. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 1991;24(5):449-458. URL: <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=5108371>
13. Govindasamy S., Campanella O. H., Oates C. G. The single screw extruder as a bioreactor for sago starch hydrolysis. *Food Chemistry*. 1997;60(1):1-11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(96\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00100-8)
14. Govindasamy S., Campanella O. H., Oates C. G. Enzymatic hydrolysis and saccharification optimisation of sago starch in a twin-screw extruder. *Journal of Food Engineering*. 1997;32(4):427-446. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00016-2)
15. Stepanov V. I., Ivanov V. V., Sharikov A. Yu., Ponomarev V. V., Khabibulina N. V. *Novyy printsip glubokoy pererabotki krakhmalosoderzhashchego syr'ya v tekhnologii polucheniya sakharistykh produktov*. [Novel technology of processing of starch-containing raw materials into starch-based sweeteners and food ingredients]. *Biotekhnologiya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: mat-ly IX Mezhdunarod. kongressa*. [Biotechnology: state and prospects of development: Proceedings of the IXth International Congress]. Moscow: *ООО "RED GRUPP"*, 2017. pp. 260-262. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29271317>
16. Stepanov V. I., Ivanov V. V., Sharikov A. Yu., Amelyakina M. V., Polivanovskaya D. V., Serba E. M. *Upravlyaemaya sistema nepreryvnoy pererabotki rastitel'nogo syr'ya na osnove termomekhanicheskikh i biokataliticheskikh protsessov*. [The system of continuous thermomechanical and biocatalytic processing of plant materials]. *Pishchevaya promyshlennost'*. 2019;(4):101-102. (In Russ.).

Сведения об авторах

✉ **Шариков Антон Юрьевич**, кандидат техн. наук, врио заведующего отделом, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, д. 4Б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9483-5209>, e-mail: anton.sharikov@gmail.com

Амелякина Мария Валентиновна, кандидат техн. наук, научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, д. 4Б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

Иванов Виктор Витальевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, д. 4Б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

Поливановская Дарья Викторовна, младший научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, д. 4Б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6078-9280>

Information about the authors

✉ **Anton Yu. Sharikov**, PhD in Engineering, acting head of the department, Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9483-5209>, e-mail: anton.sharikov@gmail.com

Maria V. Amelyakina, PhD in Engineering, researcher, Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

Victor V. Ivanov, PhD in Engineering, leading researcher, Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

Daria V. Polivanovskaya, junior researcher, Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6078-9280>

✉ – Для контактов / Corresponding author