

УДК 664.15

## ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПАТОКИ ИЗ КУКУРУЗНОГО КРАХМАЛА

**Волончук С.К., Резепин А.И.**

*Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологии РАН*

*Сибирский научно-исследовательский и технологический институт переработки*

*сельскохозяйственной продукции, п. Краснообск, Новосибирская обл., e-mail: volonchuk 2015@yandex.ru*

Исследования проводили с целью повышения эффективности технологии получения патоки из кукурузного крахмала путем сокращения времени ферментативного гидролиза (ФГ) крахмала и энергозатрат в процессе ее производства. Работу проводили в лаборатории института переработки сельскохозяйственной продукции в рамках выполнения НИР. В качестве сырья использовался кукурузный крахмал нативный и подвергнутый обработке инфракрасным излучением, генерируемым галогеновыми лампами марки КГТ. Ферментативный гидролиз необлученного и облученного кукурузного крахмала проводили на установке роторно-импульсного типа (РПА), разработанной в СибНИТИП. Контролировали следующие параметры: расход энергии, время гидролиза, температура. Внесение ферментных препаратов осуществляли по известной схеме. Количественные значения содержания сахаров в патоке в процессе ферментативного гидролиза крахмала определяли по ГОСТ 26176-91 в соответствии с динамикой этапов процесса. Установлено, что уровень содержания сахаров в патоке около 17% достигается через 160 мин ферментативного гидролиза облученного крахмала и через 280 мин. необлученного крахмала. При этом удельные энергозатраты на гидролиз составили для необлученного – 5,45 кВт·ч/кг, для облученного – 4,04 кВт·ч/кг, то есть уменьшились в 1,75 раза. Максимальное количество сахаров 25–26% отмечено в патоке из облученного крахмала. В результате математической обработки экспериментальных данных получены уравнения, с высокой достоверностью описывающие динамику процесса ферментативного гидролиза облученного и необлученного крахмалов. Делается вывод о положительном влиянии ИК облучения крахмала при проведении его ФГ в процессе получения патоки крахмальной.

**Ключевые слова:** ферментативный гидролиз, крахмал, патока, сахара, энергозатраты

## SUBSTANTIATION OF INCREASE OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING MOLASSES FROM CORN STARCH

**Volonchuk S.K., Resepin A.I.**

*Federal State Institution of Science Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnology of the RAS,*

*Siberian research and technological Institute processing of agricultural products,*

*p. Krasnoobsk, Novosibirsk region, e-mail: volonchuk2015@yandex.ru*

The studies were carried out with the aim of increasing the efficiency of the technology for the production of molasses from corn starch by reducing the time of fermentative hydrolysis (FG) of starch and energy consumption in the process of its production. The work was carried out in the laboratory of the Institute of processing of agricultural products in the framework of the research. As raw materials used native corn starch and subjected to processing by infrared radiation generated by halogen lamps of the KGT brand. Enzymatic hydrolysis of non-irradiated and irradiated corn starch was performed using the rotor-pulse type (RPA), developed in SibNITIP. The following parameters were monitored: power consumption, hydrolysis time, temperature. Introduction of enzyme preparations was carried out according to the known scheme. Quantitative values of the sugar content in the flow during enzymatic hydrolysis of starch were determined according to GOST 26176-91 in accordance with the dynamics of the process stages. It is established that the level of sugar content in the flow of about 17% is achieved through 160 minutes. enzymatic hydrolysis of irradiated starch and through 280 minutes. In this case the specific energy consumption for hydrolysis made for non-irradiated – 5,45 kW·h/kg for irradiated -4,04 kWh/kg, a decline of 1.75 times. The maximum amount of sugars 25-26% noted in molasses from irradiated starch. The value of the amount of sugars in molasses from non-irradiated starch remains unchanged at 17%. As a result of mathematical processing of experimental data using the approximation method of least squares equations are obtained with high accuracy of describing the dynamics of the process of fermentative hydrolysis of irradiated and non-irradiated starches.

**Keywords:** enzymatic hydrolysis, starch, molasses, sugars, energy consumption

Крахмал и сахаристые крахмалопродукты (патоки, глюкозные и глюкозо-фруктозные сиропы) имеют устойчивый и стабильно возрастающий спрос. Мировое производство глюкозно-фруктозных сиропов составляет около 15 млн т в год. В странах – основных производителях крахмала и крахмалопродуктов (США, Канада, Германия, Франция, Дания, Голландия, Япония и Таиланд), ежегодное производство

крахмала и сахаристых крахмалопродуктов составляет 20–50 кг на душу населения, в России – лишь 0,2 кг. Согласно национальной Программе «Развитие биотехнологии в РФ на 2006–2015 гг.», принятой на III Съезде биотехнологов, организация производства глюкозо-фруктозных сиропов является приоритетным направлением в развитии отечественной биотехнологии [1]. Существующие промышленные техноло-

гии биоконверсии крахмалов на сахаристые крахмалопродукты являются сложными многостадийными, энергоёмкими процессами [2]. Одна из причин этого – морфологические особенности нативного крахмала, особенно полукристаллическая структура крахмальных гранул, существенным образом препятствующая ферментативной доступности нативного крахмала. Следовательно, гипотетически, изменив фазовую, морфологическую и молекулярную структуры крахмала и увеличив доступность ферментов, можно сократить продолжительность процесса ферментативного гидролиза крахмала в патоку и уменьшить энергозатраты.

Анализ научных публикаций показал, что перспективно использовать крахмал, обработанный инфракрасным излучением (ИК), генерируемым галогеновыми лампами марки КГТ 220-1000. В результате облучения происходит декстринизация – разрушение крахмальных гранул с одновременной трансформацией амилозы и амилопектина, делая их более доступными для ферментов [3, 4].

Цель исследования: определение возможного уменьшения значений параметров времени и энергозатрат при ферментативном гидролизе крахмала, обработанного инфракрасным излучением, в процессе получения патоки крахмальной.

#### Материалы и методы исследования

Для исследований был подготовлен кукурузный крахмал нативный (контроль) и обработанный ИК излучением [3] в количестве 3 кг каждого. ИК обработку крахмала проводили при плотности потока 18 кВт/м<sup>2</sup> и 30 минутах облучения в прерывистом режиме с продолжительностью вспышки ИК ламп 4 с и отстоем 12 с. Такой режим предотвращает поверхностную карамелизацию крахмала. Толщина слоя крахмала составляла 7 мм. ИК обработанный крахмал имел степень декстринизации 34,4–42,0 мг глюкозы/г сухого вещества, определенную по ГОСТ 29177-91 [5]. Вода питьевая в количестве 7 литров.

Исследование параметров ферментативного гидролиза ИК обработанного крахмала и нативного в патоку крахмальную проводилось на разработанной в СибНИТИП установке РПА (рис. 1).

Роторно-импульсные аппараты (РПА) относятся к гидромеханическим преобразователям механической энергии в акустическую, тепловую, что позволяет интенсифицировать гидромеханические и тепло-массообменные процессы в нестационарных потоках при обработке гетерогенных сред [6]. При прохождении через кавитационную ячейку (поз. 5, рис. 1) происходит схлопывание пузырьков в жидкости с выделением теплоты, в результате чего повышается температура воды и реакционной смеси.

При гидролизе крахмала контролировали следующие параметры: расход энергии, кВт·ч; время обработки, мин; температура, °С.

В ёмкость рециркуляции заливалась вода с pH 4,9 и включался диспергатор. Через 15 минут температура

воды достигала 35–37 °С, что служило сигналом для равномерного, порциями, внесения крахмала (нативный или ИК обработанный) в ёмкость рециркуляции. По окончании внесения крахмала, после достижения температуры в смеси 45 °С, вносилась мультиэнзимная композиция МЭК-1, а после достижения температуры в смеси 65 °С вносилась мультиэнзимная композиция МЭК-2. Это соответствует стандартной схеме, когда под действием ферментов происходит стадия желатинизации-клейстеризации и начинается накопление сахаров. Соотношение вода: крахмал (гидромуль) обычно формируется в пропорции 2,65:1 на основании ранее проведенных в институте исследований [7].

Далее гидродинамическая обработка крахмала в присутствии ферментов осуществлялась путем многократного прохождения через рабочие органы РПА, при этом колебания температуры в пределах 50–65 °С контролировались термодатчиком ДТС 045-50.

Через 100, 160, 220, 280 и 340 минут процесса ферментативного гидролиза (ФГ) крахмала, соответственно динамике изменения температуры этапов процесса: клейстеризация (желатинизация), ожигание, осахаривание – производился отбор проб реакционной смеси для определения содержания общего сахара. Определение содержания сахаров проводилось согласно ГОСТ Р 52060-2003 [8] в аналитической лаборатории института.

Контроль энергозатрат на производство патоки осуществлялся электросчетчиком «Меркурий», ГОСТ 52322-2005.

Для сравнения аналогичные операции (ФГ) проводились с необлученным (нативным) крахмалом.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В результате исследования установлены значения содержания сахаров в патоке при обработке в РПА нативного (не облученного) и ИК облученного крахмала при идентичных режимах обработки и отбора проб (табл. 1).

Анализ полученных данных показал, что после внесения ферментов на стадиях разжижения и осахаривания количество сахаров в реакционной смеси с ИК облученными образцами превалирует, нарастая по мере протекания процесса гидролиза (пробы 2–5 в опытах № 1 и № 2–6). Причем разница в содержании сахаров нарастает по мере прохождения процесса ферментативного гидролиза (рис. 2). Вероятно, это вызвано тем, что молекулы амилозы и амилопектина в результате ИК облучения подверглись предварительной декстринизации, что облегчает прохождение ферментативного гидролиза.

Из данных (табл. 1) видно, что максимум сахаров из необлученного крахмала, около 17%, достигается после 280 минут обработки. Для ИК облученного – близкие к 17% значения содержания сахаров наблюдаются после 160 мин обработки, нарастая по мере дальнейшей обработки до значений 24–26%. То есть продолжительность ферментативного гидролиза облученного крахмала в 1,75 раза меньше, чем необлученного.

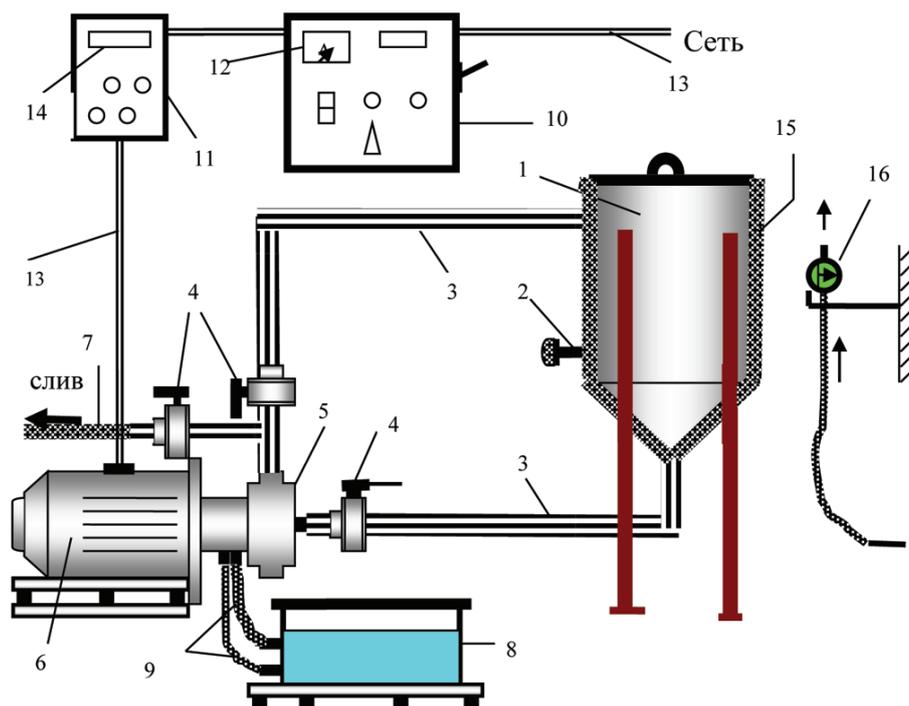


Рис. 1. Лабораторная установка ферментативного гидролиза крахмала: 1 – емкость рециркуляции; 2 – датчик температуры; 3 – продуктопровод; 4 – затворы; 5 – кавитационная ячейка; 6 – электродвигатель; 7 – слив готовой продукции/или слив в канализацию; 8 – модуль охлаждения сальникового узла; 9 – водоподводящие шланги; 10 – щит управления двигателем; 11 – частотный преобразователь; 12 – амперметр – индикатор питания двигателя; 13 – кабель электропитания; 14 – индикатор скорости вращения двигателя; 15 – теплоизоляция; 16 – расходомер воды и шланг подвода воды

Таблица 1

Содержание общего количества сахаров в патоке после ферментативного гидролиза

№ п.п.	Продолжительность обработки, мин				
	Номер пробы				
	100 1	160 2	220 3	280 4	340 5
	Содержание общего количества сахаров в патоке, %				
1 (без облучения)	5,88 ± 0,69	12,05 ± 1,42	15,61 ± 1,84	17,15 ± 2,02	17,88 ± 2,11
2	8,17 ± 0,96	17,91 ± 2,11	20,37 ± 2,40	22,23 ± 2,62	24,83 ± 2,93
3	7,19 ± 0,85	17,11 ± 2,02	19,82 ± 2,34	21,84 ± 2,58	23,98 ± 2,83
4	8,63 ± 1,02	16,44 ± 1,94	18,83 ± 2,22	25,32 ± 2,99	26,22 ± 3,09
5	8,41 ± 0,99	17,25 ± 2,03	19,86 ± 2,34	24,42 ± 2,88	25,14 ± 2,97
6	8,75 ± 1,03	16,98 ± 2,00	20,12 ± 2,37	23,91 ± 2,82	25,63 ± 3,02

Примечание. Опыты № 2–6 – эксперименты по гидролизу облученного крахмала.

Динамика процесса ферментативного гидролиза облученного и необлученного крахмалов представлена на рис. 2.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены уравнения (1, 2), с высокой степенью достоверности на уровне 5% описывающие зави-

симость изменения содержания сахаров от времени прохождения процесса ферментативного гидролиза кукурузного крахмала.

$$Y_0 = -7,6626 + 0,1616t - 0003t^2 ;$$

$$R^2 = 0,9966, \quad (1)$$

$$Y1 = -7,2124 + 0,1855t - 0,0003t^2;$$

$$R^2 = 0,9648, \quad (2)$$

где  $Y0$  – зависимость содержания сахаров от времени обработки для необлученного крахмала;

$Y1$  – зависимость содержания сахаров от времени обработки для облученного крахмала.

Для оценки энергоэффективности процесса ферментативного гидролиза крахмала приводим данные энергозатрат (табл. 2).

Удельные энергозатраты (W/m, кВт•ч/кг) для сравнимых вариантов по одинаковому содержанию сахаров (17%) в пробах

№ 2 (облученный крахмал) и № 4 (необлученный) составляют соответственно: 3,12 кВт•ч/кг и 5,45кВт•ч/кг, то есть в 1,75 раза меньше.

### Выводы

Полученные данные подтверждают гипотезу об изменении фазовой, морфологической и молекулярной структуры крахмала в процессе физических воздействий электромагнитным полем инфракрасного диапазона волн, приводящим к нарушению кристалличности крахмальных гранул и трансформации амилозы и амилопектина, что облегчает их последующую биоконверсию.

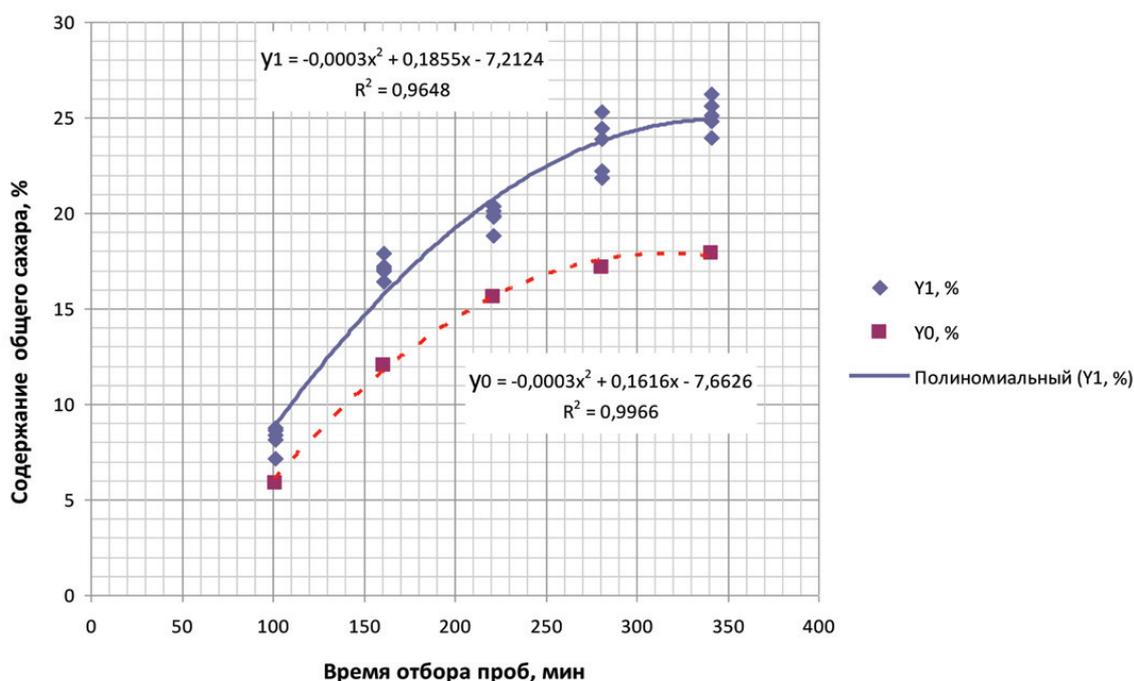


Рис. 2. Динамика изменения содержания сахаров в реакционной смеси при ферментативном гидролизе необлученного ( $Y0$ ) и ИК облученного ( $Y1$ ) кукурузного крахмала

Таблица 2

Затраты электроэнергии (W) в процессе ферментативного гидролиза облученного и необлученного крахмалов

Номера проб, №	Продолжительность обработки, мин	Варианты			
		Необлученный крахмал		Облученный крахмал	
		Общее к-во сахаров, кг	Энергозатраты, кВт•ч	Общее к-во сахаров, кг	Энергозатраты, кВт•ч
1	100	0,65	3,68	0,91	3,68
2	160	1,33	5,89	1,89	5,89
3	220	1,72	8,10	2,18	8,10
4	280	1,89	10,30	2,59	10,30
5	340	1,97	12,50	2,77	12,50

В результате выполнения данной работы научно обосновано повышение эффективности технологии получения патоки из кукурузного крахмала, подвергнутого ИК облучению перед ферментативным гидролизом.

Исследованиями установлено сокращение в 1,75 раза времени и удельных энергозатрат в процессе ферментативного гидролиза при получении патоки из ИК облученного крахмала по сравнению с необлученным, содержащей одинаковое количество сахаров – 17%. Продолжение процесса гидролиза ИК облученного крахмала ведет к увеличению количества сахаров до 24–26%, т.е. происходит более полная конверсия крахмала.

Результаты работы могут быть рекомендованы при разработке инновационных технологий получения патоки из крахмалов.

#### Список литературы

1. Коваленко Г.А. Современные технологии переработки растительного сырья в сахаристые крахмалопродукты (патоки, сиропы) / Г.А. Коваленко, Л.В. Перминова // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 1. – С. 80.
2. Трегубов Н.Н. Технология крахмала и крахмалопродуктов / Н.Н. Трегубов, Е.Я. Жарова, А.И. Жушман, Е.К. Си-

дорова / под. ред Н.Н. Трегубова, 5-е изд. перераб. и доп. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 472 с.

3. Волончук С.К. Исследование деструкции кукурузного крахмала инфракрасным облучением / С.К. Волончук, В.В. Аксенов, А.И. Резепин // Современные тенденции развития науки и технологии: материалы XXIII заочной междунар. науч.-практ. конф. – Белгород, 2017. – № 2–3. – С. 64–67.

4. Пат. 2650408 Российская Федерация, МПК С/ЗК 1/06. Способ получения модифицированного крахмала, содержащего декстринизированные полисахариды / Волончук С.К., Аксенов В.В., Резепин А.И., Дубкова С.А.; заявитель и патентообладатель п. Краснообск, Сибирский федеральный научный центр агроботехнологий Российской академии наук. – №.2016152840/13: заявл. 30.12.2016. опубл. 11.04.2018, Бюл. № 11. – 3 с.

5. ГОСТ 29177-91. Зерно. Методы определения состояния (степени деструкции) крахмала (переиздан: август 2004 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200024405> (дата обращения: 04.07.2018).

6. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: монография / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

7. Аксенов В.В. Системный подход к интенсификации процессов биоконверсии нативных крахмалов и крахмалосодержащего сырья. Сообщение III. Проведение ферментативной биоконверсии зернового крахмалосодержащего сырья в условиях гидродинамических воздействий / В.В. Аксенов // Вестник КрасГАУ. – 2009. – Выпуск № 1. – С. 147–152.

8. ГОСТ Р 52060-2003 Патока крахмальная. Общие технические условия [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200032026> (дата обращения: 04.07.2018).