




## Влияние перемешивания на эффективность ферментативного гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала кукурузы




Антон Ю. Шариков	1	<a href="mailto:anton.sharikov@gmail.com">anton.sharikov@gmail.com</a>	 0000-0001-9483-5209
Виктор В. Иванов	1	<a href="mailto:ivanov.v.v@li.ru">ivanov.v.v@li.ru</a>	 0000-0002-6492-7070
Мария В. Амелякина	1	<a href="mailto:masha.am@mail.ru">masha.am@mail.ru</a>	 0000-0002-5138-6746

<sup>1</sup> ВНИИПБТ - филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, 111033, Россия

**Аннотация.** Влияние фактора перемешивания и его интенсивности было исследовано при разработке технологии переработки высококонцентрированных гидролизатов (50% сухих веществ), полученных из экструдированного крахмала кукурузы. Крахмал экструдировали с использованием двухшнекового экструдера при температуре 185 °С и давлении 2 МПа, гидролизовали ферментными препаратами α-амилазы и глюкоамилазы в течение 4 часов с различными режимами перемешивания. Установлена значимость влияния скорости перемешивания на степень гидролиза экструдированного крахмала, особенно в первые 2 часа ферментативной обработки. В результате 4-х часовой экспозиции декстрозный эквивалент гидролизата, инкубируемого без перемешивания, составлял 52,2, а гидролизатов, перемешиваемых с частотами 100, 200 и 500 об/мин, соответственно, 54,5; 59,3 и 59,8. Исследование реологических свойств показало, что динамическая вязкость среды без перемешивания значимо отличалась от вязкости сред с перемешиванием на протяжении всего периода гидролиза. В итоге динамическая вязкость образца без перемешивания снизилась с 3 Па·с до 0,35 Па·с, образцов с перемешиванием с 2,5-2,8 Па·с до 0,145-0,221 Па·с. Увеличение дозировки глюкоамилазы вдвое нивелировало фактор перемешивания по итогам 4-х часов гидролиза и позволило повысить значение декстрозного эквивалента на 18-35%. Декстрозный эквивалент образцов без перемешивания и с перемешиванием с частотой 200 об/мин составлял 70 и 71, соответственно. Но в первые 2 часа гидролиза фактор перемешивания для образцов с повышенной дозировкой глюкоамилазы был также статистически значимым. Проведенное исследование показало, что при проведении гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала при условии качественной гомогенизации среды с ферментом даже без перемешивания обеспечивает высокую степень биоконверсии.

**Ключевые слова:** экструзия, крахмал, фермент, гидролиз, декстрозный эквивалент, перемешивание

## Effect of agitation on the efficiency of enzymatic hydrolysis of highly concentrated media of extruded corn starch

Anton Yu. Sharikov	1	<a href="mailto:anton.sharikov@gmail.com">anton.sharikov@gmail.com</a>	 0000-0001-9483-5209
Victor V. Ivanov	1	<a href="mailto:ivanov.v.v@li.ru">ivanov.v.v@li.ru</a>	 0000-0002-6492-7070
Maria V. Amelyakina	1	<a href="mailto:masha.am@mail.ru">masha.am@mail.ru</a>	 0000-0002-5138-6746

<sup>1</sup> Russian research institute of food biotechnology – a branch of Federal research center of food, biotechnology and food safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, 111033, Russia

**Abstract.** The influence of the mixing factor and its intensity was investigated at the stage of developing a technology for processing highly concentrated hydrolysates (50% solids) of extruded corn starch. The starch was extruded using a twin-screw extruder at a temperature of 185 °C and a pressure at the die of 2 MPa. Extruded substrate was hydrolyzed with enzyme preparations of α-amylase and glucoamylase for 4 hours with different stirring modes. The significance of the stirring speed on the degree of hydrolysis of extruded starch, especially in the first 2 hours of enzymatic treatment, has been established. As a result of 4-hour exposure, the dextrose equivalent of the hydrolyzate incubated without stirring was 52.2. Dextrose equivalent of the hydrolysates stirred at speed of 100, 200 and 500 rpm was 54.5, 59.3, and 59.8, respectively. The study of rheological properties showed that the dynamic viscosity of a medium without stirring significantly differed from the viscosity of a medium with stirring throughout the entire hydrolysis period. As a result, the dynamic viscosity of the sample without stirring and with stirring decreased from 3 Pa·s to 0.35 Pa·s and from 2.5-2.8 Pa·s to 0.145-0.221 Pa·s, respectively. An double increase of the glucoamylase dosage made the mixing factor after 4 hours of hydrolysis insignificant and increased the dextrose equivalent value by 18-35%. The dextrose equivalents of samples without stirring and with stirring at a frequency of 200 rpm were 70 and 71, respectively. But in the first 2 hours of hydrolysis, the stirring factor for samples with an increased dosage of glucoamylase was also statistically significant. The study showed that hydrolysis of highly concentrated media of extruded starch under the condition of high-quality homogenization with the enzymes provides a high degree of bioconversion without the requirement for continuous mixing.

**Keywords:** extrusion cooking, starch, enzyme, hydrolysis, dextrose equivalent, agitation

Для цитирования

Шариков А.Ю., Иванов В.В., Амелякина М.В. Влияние перемешивания на эффективность ферментативного гидролиза высококонцентрированных сред экструдированного крахмала кукурузы // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 3. С. 96–103. doi:10.20914/2310-1202-2020-3-96-103

For citation

Sharikov A.Yu., Ivanov V.V., Amelyakina M.V. Effect of agitation on the efficiency of enzymatic hydrolysis of highly concentrated media of extruded corn starch. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 96–103. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-3-96-103

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

## Введение

Ферментативный гидролиз при высоком содержании сухих веществ субстрата является более целесообразным в экономическом и технологическом аспектах способом биокатализа растительного сырья, так как обеспечивает целый ряд преимуществ, в том числе более низкие капитальные затраты на аппаратно-технологическое оформление процесса при идентичной производственной мощности, снижение энергетической и экологической нагрузки на производство и окружающую среду [1, 2]. Однако конечная конверсия углеводов может снижаться с увеличением концентрации сухих веществ из-за более высокой начальной вязкости и концентрации продуктов гидролиз. Высокая вязкость может создать реологические проблемы, вызвать недостаточное перемешивание, снизить эффективность теплопередачи в системе реакторов, что приведет к низкому преобразованию углеводов [3]. Для решения подобных проблем разрабатываются альтернативные способы гидролиза растительного сырья, замещающие стадию водно-тепловой обработки или разваривания под давлением более интенсивными процессами, позволяющие исключить пики вязкости и возможные реологические проблемы. Одним из направлений является термопластическая экструзия и ее интеграция в процесс биоконверсии растительного сырья в различных вариантах [4]. Это может быть внесение биокатализатора непосредственно в камеру экструдера при высоком содержании влаги в экструзионной камере [1] или при стандартных для сухой экструзии режимах [5, 6], а также соединения экструдера с трубчатой гидролитической камерой, в которой происходит формирование гидролизата и начинается биокатализ [7]. Тем не менее, во всех указанных способах для обеспечения высокой степени биоконверсии требуется длительное время экспозиции субстрата с ферментом в условиях, оптимальных для действия ферментного препарата. Одним из важных факторов, как было указано выше, является перемешивание, в том числе как одна из составляющих энергозатрат в процессе гидролиза, особенно при повышенных концентрациях субстрата. Рядом авторов проведены исследования, касающиеся указанного аспекта процесса ферментативного гидролиза.

В технологии биоэтанола из биомассы древесины ели изучено влияние интенсивности перемешивания на скорость и степень гидролиза [8]. Например, биоконверсия была вдвое

выше после 48 часов при 500 об/мин по сравнению с 25 об/мин. Влияние перемешивания на ферментативный гидролиз частично определяется вязкостью предварительно обработанной биомассы [9]. Для предварительно обработанной паром биомассы древесины ели при низкой концентрации сухих веществ уменьшение скорости перемешивания с 600 до 100 об/мин привело к снижению конверсии глюкозы с 48 до 44% после 72 часов гидролиза. Однако, если вязкость среды увеличивали при сохранении концентрации за счет загустителя, эффект перемешивания был более значимым, в результате наблюдалось снижение биоконверсии глюкозы с 47 до 36% при таком же изменении скорости перемешивания. Для субстратов, вязкость которых быстро снижалась во время начальной фазы ферментативного гидролиза, биоконверсия практически не зависела от скорости перемешивания.

Изучены различные способы гидролиза пшеничных отрубей ксиланазой, включающие стационарную инкубацию высококонцентрированной среды без перемешивания, предварительно проэкструдированной при температуре, оптимальной для действия ксиланазы, а также биоконверсию низкоконцентрированной среды, но с постоянным перемешиванием [10]. Процесс с использованием экструдера для первоначального формирования гидролизуемой массы обеспечил эффективное действие ксиланазы на пшеничные отруби при содержании сухих веществ до 60% без необходимости непрерывного перемешивания, вероятно, из-за усиленной диффузии ферментного препарата.

Ферментативный гидролиз крахмала и крахмалсодержащего сырья в процессах пищевой биотехнологии в отличие от биоконверсии некрахмалистых полисахаридов является менее продолжительным. При этом в производстве сахаристых крахмалопродуктов концентрация сухих веществ на стадии водно-тепловой и ферментативной обработки составляет обычно 30–35% [11, 12] и лимитируется ухудшением реологических свойств гидролизатов. Экструзионно-гидролитическая технология, позволяющая исключить некоторые стадии водно-тепловой обработки, позволяет повысить концентрацию гидролизуемых сред крахмала до 50% сухих веществ [13], при этом ввиду высокой концентрации на начальной стадии биокатализа значения динамической вязкости данных сред достаточно высокие, что может накладывать ограничения на процессы их перемешивания и перекачивания по технологическим трубопроводам.

**Цель работы** – изучение влияния фактора перемешивания на гидролиз и реологические свойства высококонцентрированных крахмалистых сред проэкструдированного кукурузного крахмала.

### Материалы и методы

Объектом исследований являлся кукурузный крахмал по ГОСТ 32159–2013 «Крахмал кукурузный» влажностью 12%.

Экструдирование крахмала осуществляли на двухшнековом экструдере Werner&Pleiderer Continua 37 (Германия) с диаметром шнеков 37 мм и соотношением длина шнеков к их диаметру 27. Влагосодержание материала при экструзии довели до 15%. Производительность по крахмалу составляла 15 кг/час, скорость вращения шнеков 250 об/мин. Температура и давление экструзии составляли 185 °С и 2,0 МПа.

Ферментативный гидролиз экструдированного крахмала проводили в термостатированной емкости с концентрацией сухих веществ 50% при температуре 60 °С в течение 4 часов. Перемешивание осуществлялось рамной мешалкой, скорость вращения которой в экспериментах составляла 100, 200 и 500 об/мин.

В качестве амилолитических ферментных препаратов использовали мезофильную  $\alpha$ -амилазу активностью 3500 ед. АС/см<sup>3</sup> и глюкоамилазу активностью 13500 ед. ГлС/см<sup>3</sup>. Активность  $\alpha$ -амилазы определяли по количеству прогидролизованного крахмала в результате его гидролиза ферментами амилолитического комплекса до декстринов различной молекулярной массы при pH 6,0, температуре 30 °С в течение 10 минут. За единицу активности (АС) принимали такое количество фермента, которое катализировало гидролиз 1 г растворимого крахмала до декстринов различной молекулярной массы, что составляет 30–50% от количества крахмала, введенного в реакцию. Количество прогидролизованного крахмала определяли колориметрическим методом по разнице между интенсивностью окраски с раствором йода исходного и остаточного крахмала. Глюкоамилазную активность (ГлС) определяли методом количественного определения глюкозы, образующейся при гидролизе крахмала глюкоамилазой при температуре 30 °С, значении pH 4,7 и длительности 10 минут. За единицу глюкоамилазной активности принимали такое количество фермента, которое высвобождало за 1 мин 1 мкмоль глюкозы.

В соответствии с дизайном эксперимента, на первом этапе изучалось влияние скорости перемешивания на гидролиз высококонцентрированной среды при дозировке ФП: 4 ед. АС/г крахмала и 6 ед. ГлС/г крахмала. На втором этапе оценивалось, как увеличение дозировки глюкоамилазы, фермента, оказывающего слабое влияние на реологические свойства гидролизатов, но при этом специфического

для глубокого биокатализа крахмала, повлияет на степень гидролиза сред с перемешиванием и без. На этом этапе дозировка  $\alpha$ -амилазы не изменялась, а дозировка глюкоамилазы увеличивалась до 12 ед. ГлС/г крахмала.

Влажность сырья и продуктов гидролиза определяли гравиметрическим методом с использованием анализатора влажности ML-50 (A&D, Япония).

Степень гидролиза характеризовали по декстрозному эквиваленту (ДЭ), значения которого оценивали по ГОСТ Р 50549–93 «Продукты гидролиза крахмала. Определение восстанавливающей способности и эквивалента глюкозы. Метод постоянного титра Лейна и Эйнара».

Динамическую вязкость гидролизатов в процессе экспериментальных работ измеряли методом вибрационной вискозиметрии с использованием вискозиметра SV-10 (A&D, Япония).

Отбор проб для определения декстрозного эквивалента и динамической вязкости гидролизатов проводили каждый час с момента начала гидролиза.

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.

### Результаты

На первом этапе изучали непосредственное влияние перемешивания на качество биокатализа высококонцентрированного гидролизата экструдата кукурузного крахмала при дозировке  $\alpha$ -амилазы 4 ед. АС/г крахмала и глюкоамилазы 6 ед. ГлС/г крахмала. На рисунке 1 представлены данные по влиянию скорости перемешивания на декстрозный эквивалент гидролизата с концентрацией 50% сухих веществ.

На момент 1 часа гидролиза значения ДЭ для сред, перемешиваемых с частотой 200 и 500 об/мин, были статистически неразличимы. Относительно среды, инкубируемой без перемешивания, ДЭ за счет интенсивного массообмена увеличился на 55–56% с 28,3 до 44, для гидролизата, перемешиваемого с частотой 100 об/мин, – только на 14,8%. Стоит отметить, что значения ДЭ гидролизатов с перемешиванием 200 и 500 об/мин статистически не различались на протяжении всего времени гидролиза в течение 4 часов. При этом с увеличением времени экспозиции различие в ДЭ от сред, гидролизующихся в условиях неинтенсивного массообмена сокращались. Так, на момент 4 часов гидролиза ДЭ гидролизата, инкубируемого без перемешивания, составлял 52,2, гидролизатов, перемешиваемых с частотами 100, 200 и 500 об/мин, соответственно, 54,5; 59,3 и 59,8.

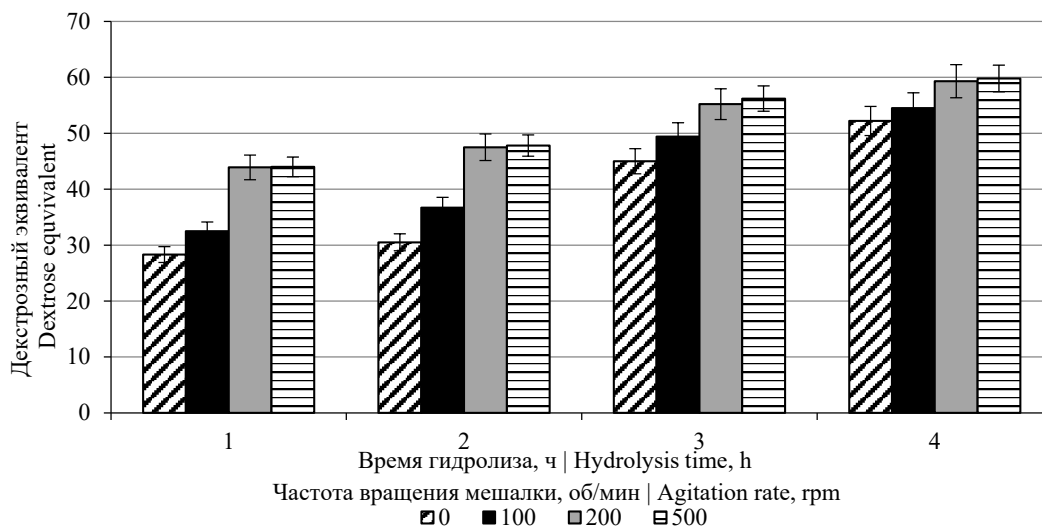


Рисунок 1. Влияние частоты перемешивания на динамику изменения декстрозного эквивалента гидролизатов при дозировке ФП 4 ед. АС/г крахмала и 6 ед. ГЛС/г крахмала

Figure 1. Influence of agitation rate on the dynamics of changes in dextrose equivalent of hydrolysates at enzymes dosages of 4 Units of amylolytic activity per 1 g of starch and 6 Units of glucoamylase activity per 1 g of starch

На рисунке 2 представлена зависимость изменения динамической вязкости гидролизатов от частоты перемешивания в течение биокатализа. В период формирования гидролизуемой среды как и в случае с показателем ДЭ реологические свойства сред, перемешиваемых

со скоростью 200 и 500 об/мин, статистически не различались друг от друга, при этом значительно отличались от гидролизата, инкубируемого без перемешивания, и среды с перемешиванием 100 об/мин. После 4 часов гидролиза вязкость всех гидролизатов снизилась значительно.

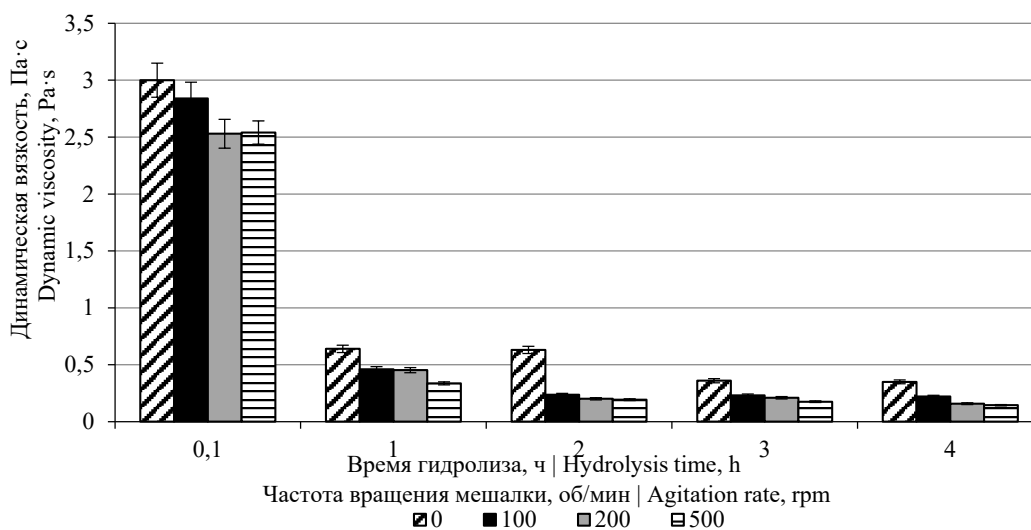


Рисунок 2. Влияние частоты перемешивания на изменение динамической вязкости гидролизатов при дозировке ФП 4 ед. АС/г крахмала и 6 ед. ГЛС/г крахмала

Figure 2. Influence of agitation rate on the dynamic viscosity of hydrolysates at enzymes dosages of 4 Units of amylolytic activity per 1 g of starch and 6 Units of glucoamylase activity per 1 g of starch

Из представленной диаграммы видно, что на протяжении всего периода биокатализа за исключением начального этапа динамическая вязкость перемешиваемого гидролизата значительно превышает этот показатель у перемешиваемых сред. Тем не менее, вязкость указанного образца сократилась с 3 Па×с до 0,35 Па×с.

Динамическая вязкость гидролизата, полученного с самым интенсивным перемешиванием 500 об/ мин в процессе биокатализа снизилась с 2,54 Па×с до 0,145 Па×с.

Изучен эффект увеличения дозировки глюкоамилазы на степень гидролиза экструдированного крахмала кукурузы в различных условиях массобмена – с перемешиванием и без.

Сравнение различных вариантов биокатализа представлено на диаграмме рисунка 3. Данный эксперимент можно рассматривать как оценку влияния сразу трех факторов на ДЭ продуктов гидролиза: время экспозиции, скорость перемешивания и дозировка глюкоамилазы. По истечении 1 часа гидролиза минимальное значение ДЭ, которое составило 32,5, было отмечено для образца без перемешивания с дозировкой ФП 4 ед. АС и 6 ед. ГЛС на 1 г крахмала, а максимальное – для образца с перемешиванием и дозировкой ФП 4 ед. АС и 12 ед. ГЛС на грамм крахмала. ДЭ данного варианта оставался максимальным на протяжении всего периода наблюдения и на 4 часа биокатализа составил 71. Вообще, с течением времени на момент 4 часов

гидролиза ДЭ для всех образцов увеличился значительно и прирост составил 36–100%. Минимальный прирост соответствовал образцам с перемешиванием, так как уже на начальном периоде гидролиза степень биокатализа крахмала в них была значительно выше. В первые два часа гидролиза именно фактор перемешивания был более значимым, чем фактор увеличения дозировки глюкоамилазы. В этот период ДЭ образцов с перемешиванием был выше на 29–37%. Но с течением времени для вариантов с увеличенной дозировкой глюкоамилазы можно отметить, что различие ДЭ на момент 3 и 4 часов гидролиза становится статистически незначимым.

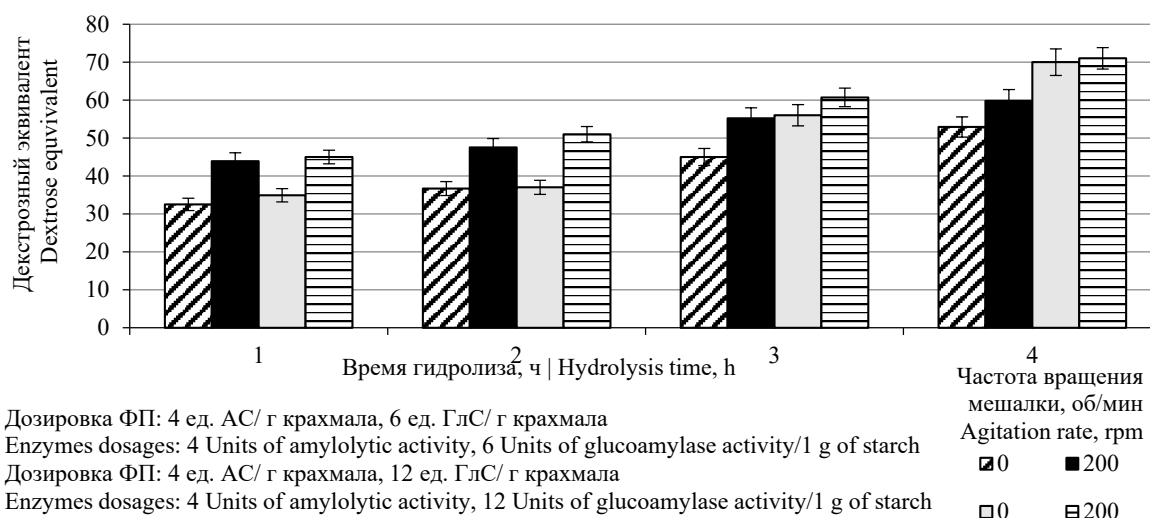


Рисунок 3. Влияние частоты перемешивания на динамику изменения декстрозного эквивалента при дозировке ФП 4 ед. АС/г крахмала, 6 ед. ГЛС/г крахмала и 12 ед. ГЛС/г крахмала

Figure 3. Influence of agitation rate on the dynamics of changes in dextrose equivalent of hydrolysates at enzymes dosages of 4 Units of amylolytic activity per 1 g of starch, 6 and 12 Units of glucoamylase activity per 1 g of starch

### Обсуждение

Переход к высококонцентрированным средам в биотехнологии относительно новая тенденция, связанная как с развитием новых способов организации процессов биоконверсии, так и возможностью использования новых, высокоэффективных ферментных препаратов. В задачи нашего исследования в аспекте развития экструзионно-гидролитической технологии входила необходимость оценки возможности проведения ферментативного гидролиза уже сформированного гидролизата экструдированного крахмала без перемешивания в течение нескольких часов. Стратегия перехода на переработку повышенных концентраций пшеничных отрубей, описываемую в работе Сантала с коллегами [10], оказалась вполне успешной,

при условии смешивания и формирования катализируемой среды (смесь отрубей, воды и ксиланазы) в экструдере. Используя похожий подход, отличающийся только способом формирования гидролизата, за счет того, что вязкость концентрированных гидролизатов экструдированного крахмала значительно ниже вязкости сред с большим количеством некрахмалистых полисахаридов, мы имели возможность не просто сравнить два способа биоконверсии: высококонцентрированной среды без перемешивания и низкоконтрированной с перемешиванием, а изучить непосредственно влияние фактора перемешивания.

В исследовании ферментативного гидролиза глюкана древесной биомассы в глюкозу [8] установлено, что скорость вращения мешалки значительно влияла на качество биокатализа как

при низкой, так и при высокой дозировке ФП. При максимальной частоте вращения 500 об/мин конверсия через 48 часов составила 57% в сравнении с 26% при скорости перемешивания 25 об/мин. Для обеих дозировок ферментов при этом наблюдалась почти линейная зависимость между скоростью перемешивания и конверсией. Отмечено, что положительный эффект перемешивания сохранялся на протяжении всего процесса гидролиза. Если сравнивать данные наблюдения с результатами экспериментов нашего исследования, то можно выделить несколько отличий в тенденциях с учетом различия в сырье. В нашем случае фактор перемешивания значим только при нижнем для эксперимента уровне дозировки фермента глюкоамилазы. Так, на момент 4 часов ДЭ гидролизата, перемешиваемого со скоростью 500 об/мин, был выше на 9% гидролизата с перемешиванием 100 об/мин и на 15% – без перемешивания. Но при высокой дозировке глюкоамилазы фактор перемешивания был значим только в первые 2 часа гидролиза. Значимость повышения дозировки ФП при комбинировании различных режимов биоконверсии показана в исследовании ферментативного гидролиза целлюлазой пивной дробины [14]. Установлено, что самые высокие значения качественных показателей, выхода глюкозы и конверсии целлюлозы, 93,1 и 99,4%, соответственно, были получены при самых низких в опыте частоте перемешивания (100 об/мин) и концентрации субстрата, а также максимальной дозировке ФП. Анализ управляющих факторов эксперимента показал, что только дозировка фермента оказывала значимое влияние на степень конверсии. Две другие исследуемые переменные, скорость перемешивания и концентрация субстрата, не оказали значительного влияния на выход глюкозы. Аналогичная тенденция отмечена для конверсии глюкана во время гидролиза при высокой 300 об/мин и низкой 100 об/мин интенсивности перемешивания [9]: при сравнении биокатализа при низком и высоком содержании твердых веществ (7 и 13%) показано, что более высокая скорость перемешивания

не улучшила гидролиз по сравнению с исходным уровнем с низким содержанием твердых веществ. Однако низкая интенсивность перемешивания 100 об/мин значительно снизила скорость гидролиза при высокой концентрации субстрата. Таким образом, по литературным данным и результатам исследования можно сделать вывод, что перемешивание конечно является важным аспектом проведения процесса биоконверсии, но многое определяет и концентрация среды, а еще больше – дозировка ФП. Увеличение дозировки глюкоамилазы вдвое по результатам 4 часов обработки позволило увеличить ДЭ на 18–35%, а главное – нивелировать различие в степени гидролиза сред с перемешиванием и без, ДЭ в данных опытах составил 71 и 70, соответственно. Видимо, такое количество ФП в сочетании с высокой концентрацией среды, но относительно низкой вязкостью было достаточным, чтобы обеспечить тоже качество гидролиза, что и с интенсивным массообменом.

### Заключение

Проведенное исследование показало, что при осуществлении гидролиза высококонцентрированных сред при условии качественной гомогенизации среды с ферментом даже без перемешивания возможно обеспечить высокую степень конверсии биополимеров растительного сырья. Этот аспект проведения гидролиза является важным, так как на начальном этапе гидролиза динамическая вязкость гидролизующих сред с высоким содержанием проэкструированного крахмала 50% и выше все-таки может вызывать проблемы с их перемешиванием и перекачиванием. Но уже после 1 часа гидролиза вязкость значительно снижается, даже если гидролизат не перемешивали. В аспекте высокой степени биоконверсии при таком способе гидролиза необходимо отметить важное значение термопластической экструзии, которая значительно повышает ферментативную атакуемость крахмалистых субстратов амилолитическими ферментными препаратами.

### Литература


- 1 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. V. 47. № 2. P. 214–225. doi:10.1016/j.jcs.2007.03.011
- 2 Da Silva A.S., Espinheira R.P., Teixeira R.S.S., de Souza M.F. et al. Constraints and advances in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: a critical review // *Biotechnology for Biofuels*. 2020. doi:10.1186/s13068-020-01697-w
- 3 Geng W., Yongcan J., Hasan J., Sunkyu P. Strategies to achieve high-solids enzymatic hydrolysis of dilute-acid pretreated corn stover // *Bioresource technology*. 2015. V. 187. P. 43–48. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.067


- 4 Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология, 2019. Т. 9. № 3 (30). С. 447–460. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460
- 5 Xu E., Wu Z., Long J., Wang F. et al. Impact of high-shear extrusion combined with enzymatic hydrolysis on rice properties and Chinese rice wine fermentation // Food and Bioprocess Technology. 2015. V. 8. P. 589–604. doi:10.1007/s11947-014-1429-0
- 6 Zeng Z., LiY., Yang R., Liu Ch. et al. The relationship between reducing sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion // Journal of Cereal Science. 2017. V. 74. P. 244–249. doi: 10.1016/j.jcs.2017.02.016
- 7 Степанов В.И., Иванов В.В., Шариков А.Ю., Амелякина М.В. и др. Управляемая система непрерывной переработки растительного сырья на основе термомеханических и биокаталитических процессов // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 101–102. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10052
- 8 Santala O., Nordlund E., Poutanen K. Use of an extruder for pre-mixing enhances xylanase action on wheat bran at low water content // Bioresource Technology. 2013. V. 149. P. 191–199. doi: 10.1016/j.biortech.2013.09.029
- 9 Palmqvist B., Wiman M., Lidén G. Effect of mixing on enzymatic hydrolysis of steam-pretreated spruce: a quantitative analysis of conversion and power consumption // Biotechnology for Biofuels. 2011. № 4. P. 10. doi: 10.1186/1754-6834-4-10
- 10 Kadić A., Palmqvist B., Lidén G. Effects of agitation on particle-size distribution and enzymatic hydrolysis of pretreated spruce and giant reed // Biotechnology for Biofuels. 2014. V. 7. P. 77. doi: 10.1186/1754-6834-7-77
- 11 Ананских В.В., Шлеина Л.Д. О возможности получения мальтодекстринов из кукурузной муки // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 11. С. 9–13.
- 12 Ананских В.В., Шлеина Л.Д. Мальтодекстрины из крахмалосодержащего сырья, их качество и использование в отраслях пищевой промышленности // Кондитерское и хлебопекарное производство. 2018. № 7–8. С. 50–52.
- 13 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. Т. 21. № 4. С. 425–433. doi: 10.30766/2072-9081.2020.21.4.425-433
- 14 Mussatto S.I., Dragone G., Fernandes M., Milagres A.M.F. et al. The effect of agitation speed, enzyme loading and substrate concentration on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain // Cellulose. 2008. V. 15. P. 711. doi: 10.1007/s10570-008-9215-7


#### References

- 1 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. vol. 47. no. 2. pp. 214–225. doi:10.1016/j.jcs.2007.03.011
- 2 Da Silva A.S., Espinheira R.P., Teixeira R.S.S., de Souza M.F. et al. Constraints and advances in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass: a critical review. Biotechnology for Biofuels. 2020. doi:10.1186/s13068-020-01697-w
- 3 Geng W., Yongcan J., Hasan J., Sunkyu P. Strategies to achieve high-solids enzymatic hydrolysis of dilute-acid pretreated corn stover. Bioresource technology. 2015. vol. 187. pp. 43–48. doi: 10.1016/j.biortech.2015.03.067
- 4 Sharikov A.Yu., Stepanov V.I., Ivanov V.V. Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes. Proceedings of universities. Applied chemistry and biotechnology. 2019. vol. 9. no. 3. pp. 447–460. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460 (in Russian).
- 5 Xu E., Wu Z., Long J., Wang F. et al. Impact of high-shear extrusion combined with enzymatic hydrolysis on rice properties and Chinese rice wine fermentation. Food and Bioprocess Technology. 2015. vol. 8. pp. 589–604. doi:10.1007/s11947-014-1429-0
- 6 Zeng Z., LiY., Yang R., Liu Ch. et al. The relationship between reducing sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion. Journal of Cereal Science. 2017. vol. 74. pp. 244–249. doi: 10.1016/j.jcs.2017.02.016
- 7 Stepanov V.I., Ivanov V.V., Sharikov A.Yu., Amelyakina M.V. et al. The system of continuous thermomechanical and biocatalytic processing of plant materials. Food processing industry. 2019. no. 4. pp. 101–102. doi: 10.24411/0235-2486-2019-10052 (in Russian).
- 8 Santala O., Nordlund E., Poutanen K. Use of an extruder for pre-mixing enhances xylanase action on wheat bran at low water content. Bioresource Technology. 2013. vol. 149. pp. 191–199. doi:10.1016/j.biortech.2013.09.029
- 9 Palmqvist B., Wiman M., Lidén G. Effect of mixing on enzymatic hydrolysis of steam-pretreated spruce: a quantitative analysis of conversion and power consumption. Biotechnology for Biofuels. 2011. no. 4. pp. 10. doi: 10.1186/1754-6834-4-10
- 10 Kadić A., Palmqvist B., Lidén G. Effects of agitation on particle-size distribution and enzymatic hydrolysis of pretreated spruce and giant reed. Biotechnology for Biofuels. 2014. vol. 7. pp. 77. doi: 10.1186/1754-6834-7-77
- 11 Ananskikh V.V., Shleina L.D. About a possibility of receiving maltodextrins from cornmeal. Storage and Processing of Farm Products. 2017. no. 11. pp. 9–13. (in Russian).
- 12 Ananskikh V.V., Shleina L.D. Maltodextrins from starchy raw materials, their quality and use in the food industry. Confectionery and bakery production. 2018. no. 7–8. pp. 50–52. (in Russian).
- 13 Sharikov A. Yu., Amelyakina M.V., Ivanov V.V., Polivanovskaya D.V. Enzymatic hydrolysis of high gravity extruded corn starch media. Agricultural Science Euro-North-East. 2020. vol. 21. no. 4. pp. 425–433. doi: 10.30766/2072-9081.2020.21.4.425-433 (in Russian).
- 14 Mussatto S.I., Dragone G., Fernandes M., Milagres A.M.F. et al. The effect of agitation speed, enzyme loading and substrate concentration on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain. Cellulose. 2008. vol. 15. pp. 711. doi: 10.1007/s10570-008-9215-7

**Сведения об авторах**

**Антон Ю. Шариков** к.т.н., зав. отделом, отдел оборудования пищевых производств и мембранных технологий, ВНИИПБТ - филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, 111033, Россия, anton.sharikov@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

**Виктор В. Иванов** к.т.н., вед. науч. сотрудник, отдел оборудования пищевых производств и мембранных технологий, ВНИИПБТ - филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, 111033, Россия, ivanov.v.v@li.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

**Мария В. Амелякина** к.т.н., науч. сотрудник, отдел оборудования пищевых производств и мембранных технологий, ВНИИПБТ - филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», ул. Самокатная, 4Б, г. Москва, 111033, Россия, masha.am@mail.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>


**Вклад авторов**


**Антон Ю. Шариков** написал рукопись, корректировал её до подачи в редакцию и несет ответственность за плагиат  
**Виктор В. Иванов, Мария В. Амелякина** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, проведение эксперимента, выполнение расчетов


**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about authors**

**Anton Yu. Sharikov** Cand. Sci. (Engin.), head of department, food production equipment and membrane technologies department, Russian Research Institute of Food Biotechnology – a Branch of Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, 111033, Russian Federation, anton.sharikov@gmail.com  
 <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

**Victor V. Ivanov** Cand. Sci. (Engin.), leading researcher, food production equipment and membrane technologies department, Russian Research Institute of Food Biotechnology – a Branch of Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, 111033, Russian Federation, ivanov.v.v@li.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

**Maria V. Amelyakina** Cand. Sci. (Engin.), researcher, food production equipment and membrane technologies department, Russian Research Institute of Food Biotechnology – a Branch of Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya Str., 4B, Moscow, 111033, Russian Federation, masha.am@mail.ru  
 <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

**Contribution**

**Anton Yu. Sharikov** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism  
**Victor V. Ivanov, Maria V. Amelyakina** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

<b>Поступила</b> 20/07/2020	<b>После редакции</b> 03/08/2020	<b>Принята в печать</b> 11/08/2020
<b>Received</b> 20/07/2020	<b>Accepted in revised</b> 03/08/2020	<b>Accepted</b> 11/08/2020