ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414
https://elibrary.ru/DAHAKZ

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Конверсия пшеничных отрубей в целевые продукты биосинтеза

Н. А. Погорелова*, Н. Б. Гаврилова

Омский государственный аграрный университет им. П. А. Столыпина, Омск, Россия

Поступила в редакцию: 04.05.2022
Принята после рецензирования: 02.09.2022
Принята к публикации: 04.10.2022

**Н. А. Погорелова: na.pogorelova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-8495-3869*
Н. Б. Гаврилова: https://orcid.org/0000-0001-8544-4214

© Н. А. Погорелова, Н. Б. Гаврилова, 2023

Аннотация.
Интенсификация процесса биоконверсии возобновляемых ресурсов растительного происхождения является приоритетным направлением современной биотехнологии. Важной стороной проведения обработки и предобработки целлюлозного сырья (в том числе отрубей) является получение в конечном продукте высокого содержания редуцирующих веществ. Цель исследования – определение оптимальных условий химической трансформации растительных полимеров для получения биологически ценных веществ. Это позволит снизить себестоимость конечного продукта биотехнологического производства.
В данной работе конверсию полимеров пшеничных отрубей осуществляли в процессе химической обработки серной кислотой. Оценка степени конверсии полимеров проводилась на нативных и механически активированных пшеничных отрубях фракции 600, 200 и 100 мкм. Исследования кинетики процесса высокотемпературного химического гидролиза механически активированных пшеничных отрубей осуществляли при варьировании технологических параметров: в диапазоне температуры 120–130 °С, концентрации серной кислоты 0,6–0,9 %, продолжительности обработки 30–60 мин и гидромодуле 1:8;9;10. Количественный и качественный состав моно- и дисахаридов гидролизатов определяли методом ВЭЖХ. В работе использовали комплекс общепринятых и стандартных методов исследований.
Определение состава пшеничных отрубей показало низкое содержание в них лигнина (7,55 %), высокое – пентозанов (17,9 %). Были определены оптимальные технологические условия трансформации полисахаридов с наибольшим содержанием редуцирующих веществ в гидролизатах – 640 мг/г отрубей: гидромодуль 1:10, температура 120 °С, продолжительность 45 мин и концентрация серной кислоты 0,9 %. Наибольшее изменение содержания моно- и дисахаридов гидролизатов установили для пентоз, количество их в пересчете на ксилозу – 78,2 мг/г отрубей. Количество легкогидролизуемых углеводов и клетчатки пшеничных отрубей при химической обработке уменьшалось на 80 и 19 % соответственно.
В данном исследовании установили оптимальные параметры химического гидролиза пшеничных отрубей для их конверсии в целевые продукты биосинтеза – биологически ценные углеводы. Это является перспективным направлением исследований и практического их использования в производстве биотоплива, химических веществ и пищевых добавок.

Ключевые слова. Отруби, гидролиз, полимеры, целлюлоза, хроматография, механическая активация, конверсия.

Финансирование. Работа выполнена на базе кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии Омского государственного аграрного университета им. П. А. Столыпина (Омский ГАУ) в рамках договора НИР с Министерством сельского хозяйства и природопользования Омской области.

Для цитирования: Погорелова Н. А., Гаврилова Н. Б. Конверсия пшеничных отрубей в целевые продукты биосинтеза // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 1. С. 49–59. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414
https://elibrary.ru/DAHAKZ

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Conversion of Wheat Bran into Target Biosynthetic Products

Natalya A. Pogorelova*, Natalya B. Gavrilova

P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia

Received: 04.05.2022
Revised: 02.09.2022
Accepted: 04.10.2022

**Natalya A. Pogorelova: na.pogorelova@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-8495-3869*
Natalya B. Gavrilova: https://orcid.org/0000-0001-8544-4214

© N.A. Pogorelova, N.B. Gavrilova, 2023

Abstract.
A more efficient bioconversion of renewable plant resources is a priority in modern biotechnology. An important aspect of the processing and pretreatment of cellulose raw materials is to obtain a high content of reducing substances in the final product. The present research objective was to determine the optimal conditions for the chemical transformation of plant polymers to obtain biologically valuable substances. The research results will reduce the final cost of biotechnological production.
This research featured wheat bran polymers treated with sulfuric acid and relied on a set of standard research methods. The degree of polymer conversion was tested on native and mechanically activated wheat bran fractions of 600, 200, and 100 microns. The kinetics of the high-temperature chemical hydrolysis was as follows: temperature – 120–130°C, sulfuric acid concentration – 0.6–0.9%, treatment time – 30–60 min, hydromodule – 1:8;9;10. The quantitative and qualitative composition of mono- and disaccharides of hydrolysates was determined using the high performance liquid chromatography method.
The composition of wheat bran showed a low content of lignin (7.55%) and a high content of pentosans (17.9%). The highest content of reducing substances in hydrolysates was 640 mg/g bran. The optimal technological conditions with the highest content of reducing substances were as follows: hydromodulus – 1:10, temperature – 120°C, treatment time – 45 min, and sulfuric acid concentration – 0.9%. The greatest change in the content of mono- and disaccharides of hydrolysates belonged to pentoses: 78.2 mg/g of bran (in terms of xylose). The amount of easily hydrolysable carbohydrates and wheat bran fiber decreased by 80 and 19%, respectively.
This research revealed the optimal parameters for the chemical hydrolysis of wheat bran to obtain biologically valuable carbohydrates. This area of research can be of practical use for producers of biofuels, chemicals, and food additives.

Keywords. Wheat bran, chemical hydrolysis, carbohydrate-containing raw materials, chromatography, mechanical activation

Funding. The research was performed on the premises of the Department of Food and Food Biotechnology of the P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University (Omsk SAU) as part of research agreement with the Ministry of Agriculture and Nature Management of the Omsk Region.

For citation: Pogorelova NA, Gavrilova NB. Conversion of Wheat Bran into Target Biosynthetic Products. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(1):49–59. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-1-2414

Введение

Управление процессами конверсии возобновляемых растительных ресурсов с целью получения биологически ценных углеводов и белков является перспективным направлением исследований. Пшеничные отруби и отходы мукомольного производства рассматриваются как высокопотенциальный крахмалцеллюлозный ресурс биомассы для промышленного производства биотоплива, дрожжевой биомассы и других товарных биопродуктов [1, 2]. Основные полисахаридные фракции пшеничных отрубей – крахмал, целлюлоза и гемицеллюлозы – могут подвергаться химическому и/или микробному превращению в биотопливо, химические вещества, пищевые добавки или материалы при реализации крупнотоннажных производств [3, 4]. Эффективной конверсии биомассы препятствуют структурные особенности и химическая устойчивость к дегидратации и деградации полимеров углеводной природы. Низкая способность к трансформации лигнинцеллюлозной фракции обусловлена кристаллической структурой и степенью полимеризации крахмала и целлюлозы, а также количеством гемицеллюлозы и лигнина растительного сырья [5].

Важным этапом технологического процесса является предварительная обработка, направленная на активацию полимеров биомассы, а именно их структурные разрушения различными методами: физическими (измельчение, шлифование), химическими (кислота, щелочь и ионная жидкость), биологическими (микроорганизмы, разлагающие биомассу) или физико-химическими (горячая вода, паровой взрыв и мокрое окисление) [6, 7].

В ряде исследований определены оптимальные условия и способы предварительной обработки, а также их комбинации на примере целлюлозосодержащих отходов переработки рисовых отрубей, кофейных зерен, сои, пивной дробины и т. д., которые позволяют повысить в последующей стадии биотрансформации выход и скорость образования продукта [8–11]. Химическую трансформацию целлюлозосодержащего сырья в «мягких» условиях под действием неорганических кислот используют в производстве биоэтанола в качестве предварительной обработки кислотного гидролиза, предшествующей ферментативному гидролизу растительного сырья, а также при производстве растительных белково-углеводных кормов (В. И. Панфилов, 2014) [12, 13]. Такая предварительная обработка приводит к деполимеризации и физико-химической модификации лигноцеллюлозных компонентов. Это определяет экологическую и экономическую целесообразность коммерческого производства продуктов на биологической основе [14, 15].

Исходя из литературных данных, можно предположить, что реакционную способность углеводсодержащего сырья можно увеличить с помощью предварительной механической обработки твердого целлюлозного субстрата в мельницах или специальных активаторах [16, 17]. Основными факторами, влияющими на повышение реакционной способности растительного сырья, являются механическое разрушение тканей и клеток, уменьшение размера частиц и изменение структуры компонентов сырья [18, 19]. Данная гипотеза подтверждается тем, что в результате измельчения лигноцеллюлозных материалов происходит увеличение удельной поверхности субстрата и изменение его структуры, а следовательно, повышение площади поверхности субстрата, доступного как для химического воздействия, так и биологического.

Реализация комплексных безотходных технологий переработки вторичного сырья остается одной из самых важных и актуальных задач. Поэтому исследования по использованию высокотемпературного химического гидролиза полисахаридов предварительно механически активированных пшеничных отрубей при варьировании технологических параметров (температура, концентрация неорганических кислот, гидромодуль, продолжительность обработки) актуальны.

Цель данного исследования – оценить степень эффективности трансформации полисахаридов растительного сырья (пшеничных отрубей) методом химического гидролиза.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись нативные пшеничные отруби производства ООО «МельКом» по ГОСТ 7169-17, ГОСТ 27558-87 и ГОСТ 27668-88. Предобработка пшеничных отрубей предполагала их механическую активацию в центробежной роликовой мельнице РМ-20, оснащенной водяным охлаждением (производство Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, Новосибирск), с получением фракции пшеничных отрубей 100 мкм. Режимы механической обработки – 20 и 40 Гц.

Все экспериментальные исследования процесса высокотемпературного гидролиза серной кислотой вторичного сырья осуществляли по отработанным методикам на установке высокого давления.

Использовали следующие технологические параметры процесса химического гидролиза пшеничных отрубей (рис. 1):
– гидромодуль: 1:8, 1:9 и 1:10;
– температура: 120–130 °С;
– концентрация серной кислоты: 0,6–0,9 %;
– продолжительность обработки: 30–60 мин.

Образцы полученных гидролизатов исследовали по отработанным методикам:
– количество легкогидролизуемых углеводов (крахмала) по ГОСТ 26176-91;
– массовую долю влаги по ГОСТ 9404-88;
– массовую долю клетчатки по ГОСТ 31675-2012;
– массовую долю сырого протеина по ГОСТ 13496.4-93;
– количество редуцирующих сахаров по ГОСТ 53973-2010.

Количество аминного азота определяли по методу Попа-Стивенса (Государственная фармакопея РФXIII: ОФС.1.2.3.0022.15). Сущность данной методики заключается во взаимодействии аминокислот в щелочном растворе с ионами двухвалентной меди и последующем обратном йодометрическом титровании.

Для определения содержания кислотонерастворимого лигнина и пентозанов использовали классические методики для целлюлозосодержащего сырья (А. В. Оболенская и др., 1991).

Состав моно- и дисахаридов гидролизатов определяли методом ВЭЖХ. Исследуемые образцы и калибровочные точки анализировали на ВЭЖХ-хроматографе Миллихром А-02 со следующими параметрами:
– сорбент хроматографической колонки Prontosil-C18;
– температура анализа 40 °С;
– давление в колонке 3–7 МПа;

Рисунок 1. Схема исследования химического гидролиза пшеничных отрубей

Figure 1. Chemical hydrolysis of wheat bran: research design

– детектор фотометрический;
– длины волн 220, 310, 350 и 400 нм;
– режим анализа градиентный (растворитель Б – от 20 до 22 % за 3000 мкл);
– расход элюента 250 мкл/мин;
– объем пробы 2 мкл [20].

Оценка воспроизводимости экспериментов при реализации процессов высокотемпературного гидролиза проведена по трем повторностям. Обработку полученных результатов исследования проводили с помощью программы STATISTICA 6.0, которая включает в себя широкий набор основных статистик в понятном русифицированном интерфейсе со всеми преимуществами.

Результаты и их обсуждение

Пшеничные отруби являются отходами мукомольного производства. В результате помола зерна в муку происходит механическое отделение содержимого эндосперма от остальных морфологических структур зерновки. Целостность структур зерновки нарушается, и под микроскопом видны клетки алейронового слоя в виде отдельных однослойных участков, состоящих из кубических клеток. Размеры частиц и фракционный состав пшеничных отрубей определяет степень и скорость трансформации растительных полимеров. На основании полученных расчетных данных (табл. 1) определили гранулометрический состав образцов пшеничных отрубей. Фракция пшеничных отрубей с размером частиц 360 мкм составляет около 40,5 % от общей массы всех фракций.

Таблица 1. Гранулометрический состав пшеничных отрубей

Table 1. Granulometric composition of wheat bran

Размер частиц фракций пшеничных отрубей, мкм	Массовая доля, %
630	9,9
560	4,9
360	40,5
250	21,2
140	13,5
< 100	8,1

Определение химического состава и характеристики растительного сырья является необходимым этапом следующих экспериментальных исследований. Характеристики пшеничных отрубей, отобранных для проведения химической трансформации, представлены в таблице 2.

В исследуемых нативных пшеничных отрубях обнаружено высокое количество пентозанов и низкое количество лигнина по сравнению с исследованными ранее образцами другого растительного

a b c

Рисунок 2. Пшеничные отруби: клетки алейронового слоя нативных (a) и набухших (b) отрубей, семенная оболочка (c) – целлюлоза

Figure 2. Wheat bran: cells of the aleurone layer of native bran (a), swollen (b) bran, and seed coat (c) – cellulose

Таблица 2. Химические характеристики растительного сырья – пшеничных отрубей

Table 2. Chemical profile of wheat bran

Показатель	Значение показателя
Сухие вещества, %	90,82 ± 0,12
Зольность*, %	5,98 ± 0,28
Сырая клетчатка, %	8,50 ± 1,30
Сырой протеин, %	14,70 ± 0,46
Лигнин*, %	7,55 ± 0,39
Пентозаны*, %	17,90 ± 0,01
Крахмал, %	17,80 ± 2,80
C_{Cu}, мг/кг	46,20
C_{Se}, мг/кг	0,16

* – в пересчете на сухой материал.

* – in terms of solids.

сырья – соломы пшеницы, кукурузы, древесины хвойных и лиственных растений [21]. Полученные экспериментальные результаты коррелируют с данными, представленными в научной литературе отечественных и зарубежных авторов (Б. А. Кареткин и др., 2014; F. Carvalheiro, 2004) [21, 22].

При увлажнении пшеничных отрубей захват влаги происходит вначале клетками плодовой оболочки, имеющими ячеистую структуру, а затем капиллярами, порами и пустотами, играющими роль запасных резервуаров для воды всех тканей зерна: плодовая и семенная оболочка, алейроновый слой, зародыш и крахмальные зерна.

Содержимое клеток алейронового слоя является однородным (рис. 2a), занимает весь объем и плотно прилегает к оболочке. Группа клеток представляет собой компактное образование из разорванного алейронового слоя.

Клетки алейронового слоя, несмотря на отделение от зерна, механическую обработку в результате помола и отсутствие влаги, сохраняют свою жизнеспособность. При замачивании пшеничных отрубей происходит набухание оболочек и образование в клетках множества мелких и одной или двух крупных вакуолей (рис. 2b). Целлюлоза семенных оболочек отрубей представлена в виде отдельных морфологических образований, похожих на клетки структурами (рис. 2c), но в этих структурах нет ни ядра, ни компонентов соответствующих клеток.

В результате измельчения пшеничных отрубей происходит увеличение их удельной поверхности и разупорядочение структуры, доступной для химического и биологического воздействия. Кроме того, гидролиз целлюлозы и крахмала растительного сырья затрудняют сопутствующие биополимеры: лигнин, гемицеллюлозы и пектины, а также кристалличность целлюлозы. Поэтому для увеличения реакционной способности сырья используют механический способ предварительной обработки, направленный на разрушение кристаллической структуры целлюлозы физическим воздействием. Измельчение пшеничных отрубей проводили на дисковой коллоидной мельнице с дальнейшим рассеиванием на фракции 600 и 200 мкм в соответствии с техническим заданием НИР.

На рисунке 3 представлено изменение содержания редуцирующих веществ гидролизатов отрубей при контролируемых параметрах химической обработки серной кислотой ($C_{H_2SO_4}$ = 0,7 %, T = 120 °C, t = 60 мин) нативных и исследуемых фракций пшеничных отрубей.

При увеличении гидромодуля происходит изменение содержания редуцирующих веществ: уменьшение в гидролизатах и увеличение на единицу массы пшеничных отрубей. Наибольший выход редуцирующих веществ установлен для гидромодуля 1:9. Снижение количества редуцирующих веществ гидролизатов для фракции пшеничных отрубей 200 мкм при гидромодуле 1:10 может объясняться дальнейшей деструкцией моно- и дисахаридов. В связи с тем что при механической обработке и рассеивании получены фракции со

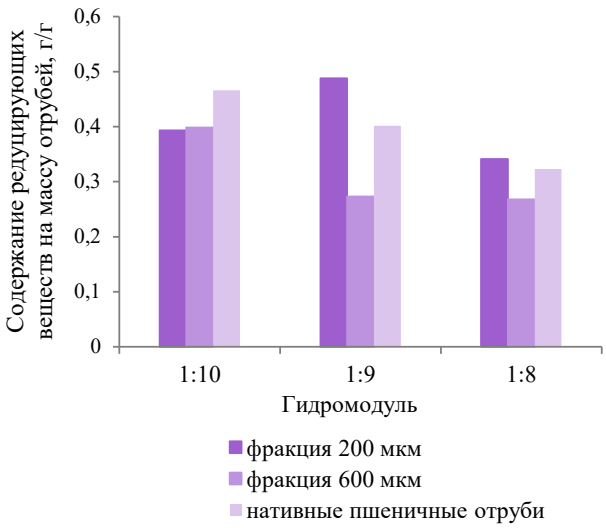

Рисунок 3. Зависимость содержания редуцирующих веществ нативных и механически измельченных пшеничных отрубей от гидромодуля после химической трансформации

Figure 3. Effect of hydromodule on the content of reducing substances in native and mechanically ground wheat bran after chemical transformation

средним размером частиц 600 и 200 мкм, состоящие из разных анатомических частей зерновки, при химическом гидролизе уровень редуцирующих сахаров различен. Наибольшее содержание редуцирующих веществ при исследуемых гидромодулях определено для фракции 200 мкм, наименьшее – для 600 мкм. Это может быть связано с большим содержанием крахмала как легкогидролизуемого полисахарида во фракции с меньшим размером частиц. Данный промежуточный вывод может являться значимым для подбора гидромодулей и необходимости механической активации пшеничных отрубей на заключительных этапах той или иной технологической цепочки модификации растительного сырья.

Аморфизация кристаллической целлюлозы растительного сырья способствует увеличению скорости гидролиза полисахаридов, поэтому методом механической активации определили целесообразность получения фракций с размером частиц менее 100 мкм. Пшеничные отруби подвергали предварительной механической обработке в центробежной роликовой мельнице РМ-20, оснащенной водяным охлаждением. Кристаллическая структура отрубей представлена крахмалом А-типа. Полученные механически активированные образцы (МА 20 Гц и МА 40 Гц) полностью аморфны.

Дальнейшие исследования в отношении химической трансформации растительных полисахаридов осуществляли с использованием механически активированных пшеничных отрубей фракции 100 мкм.

Зависимость динамики накопления редуцирующих веществ в процессе гидролиза при температуре процесса 120 °С механически активированных пшеничных отрубей от концентрации серной кислоты и гидромодуля представлена на рисунке 4.

На основании проведенных экспериментальных исследований высокотемпературного гидролиза были получены следующие результаты:

– при всех гидромодулях определено максимальное содержание редуцирующих веществ с продолжительностью гидролиза 45 мин. Дальнейшее продолжение процесса способствует снижению количества редуцирующих веществ, что является результатом образования побочных продуктов, т. е. деструкции углеводов. Это процесс нежелателен для дальнейшей биоконверсии растительных полимеров микроорганизмами и получения белковых продуктов;
– степень конверсии полисахаридов пшеничных отрубей возрастает с увеличением концентрации серной кислоты в пределах одного гидромодуля в течение выбранного интервала исследования (60 мин);
– увеличение гидромодуля способствует повышению содержания редуцирующих веществ на единицу массы сырья при химической обработке пшеничных отрубей в интервале концентрации серной кислоты (0,6–0,9 %).

В следующей серии исследований химическую обработку серной кислотой механически активированных пшеничных отрубей осуществляли в условиях $C_{H_2SO_4}$= 0,6–0,9 %, Т = 130 °С, продолжительность гидролиза 30–60 мин. Данные представлены на рисунке 5.

Анализ полученных данных показал, что изменения количества редуцирующих веществ механически активированных пшеничных отрубей, при химическом гидролизе с повышением температуры до 130 °С, аналогичны предыдущей серии экспериментов в одинаковых условиях процесса.

Содержание редуцирующих веществ выше при химической обработке пшеничных отрубей серной кислотой 0,6–0,9 % при всех гидромодулях и температуре 130 °С в сравнении с температурой 120 °С в течение 30 мин. Однако длительная химическая обработка пшеничных отрубей до 60 мин приводит к снижению редуцирующих веществ на 2,6–7,8 %, что может быть связано с более глубокой деградацией углеводов растительного сырья.

Таким образом, максимальное содержание редуцирующих веществ реакционной смеси определено для следующих условий процесса химической

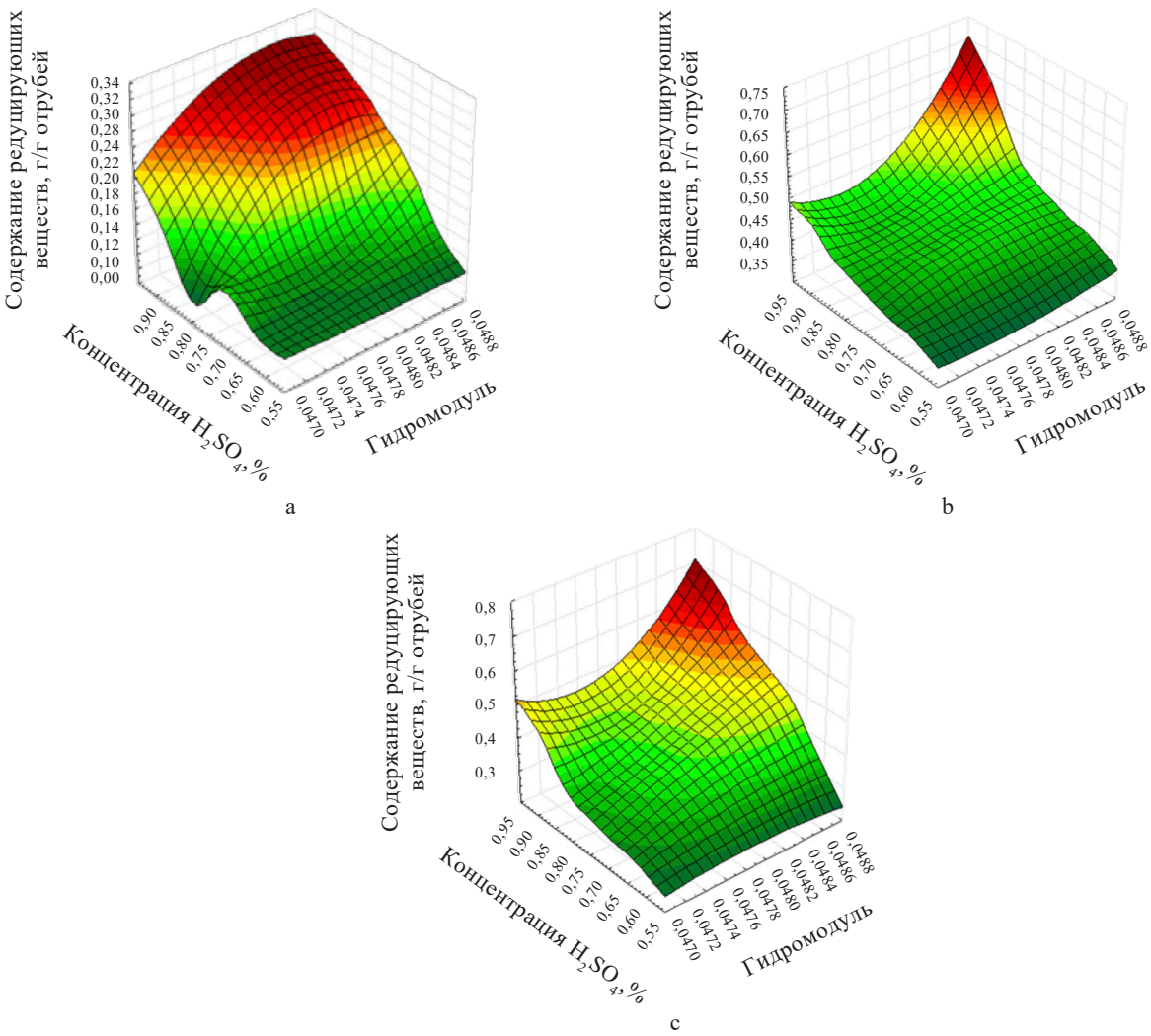

Рисунок 4. Зависимость содержания редуцирующих веществ механически активированных пшеничных отрубей от концентрации серной кислоты и гидромодуля в результате высокотемпературного гидролиза в течение 30 (a), 45 (b) и 60 мин (c) (T = 120 °C)

Figure 4. Effect of the concentration of sulfuric acid and hydromodule on the content of reducing substances in mechanically activated wheat bran as a result of high-temperature hydrolysis at 120°C after 30 min (a), 45 min (b), and 60 min (c)

обработки растительного сырья: гидромодуль 1:10, температура 120 °C, продолжительности процесса 45 мин, концентрация серной кислоты 0,9 %, что составило 604,0 мг/г отрубей.

Под действием серной кислоты происходит гидролиз гликозидных связей крахмала пшеничных отрубей. Остальные полисахариды изменяются в меньшей степени, поэтому содержание крахмала определяли после химической предобработки.

Установлено изменение основных компонентов механически активированных пшеничных отрубей при оптимальных режимах химического гидролиза растительного сырья: гидромодуль 1:10, температура 120 °C, продолжительность процесса 45 мин, концентрация серной кислоты 0,9 % (табл. 3).

Содержание крахмала (3,6 %) и сырой клетчатки (6,9 %) пшеничных отрубей уменьшилось в результате их гидролиза под действием серной кислоты на 79,8 и 18,8 % соответственно в сравнении с исходными данными сырья (17,8 и 14,7 %). Значимого изменения содержания сырого протеина и аминного азота при химической обработке пшеничных отрубей не установлено.

Таким образом, высокотемпературный гидролиз полисахаридов пшеничных отрубей серной кислотой концентрации 0,6–0,9 % может обеспечить высокую конверсию сырья в целевые продукты биосинтеза при использовании гидролизатов в качестве основы питательных сред.

Переработка растительного сырья осложнена его химическим составом. В комплексном лигно-

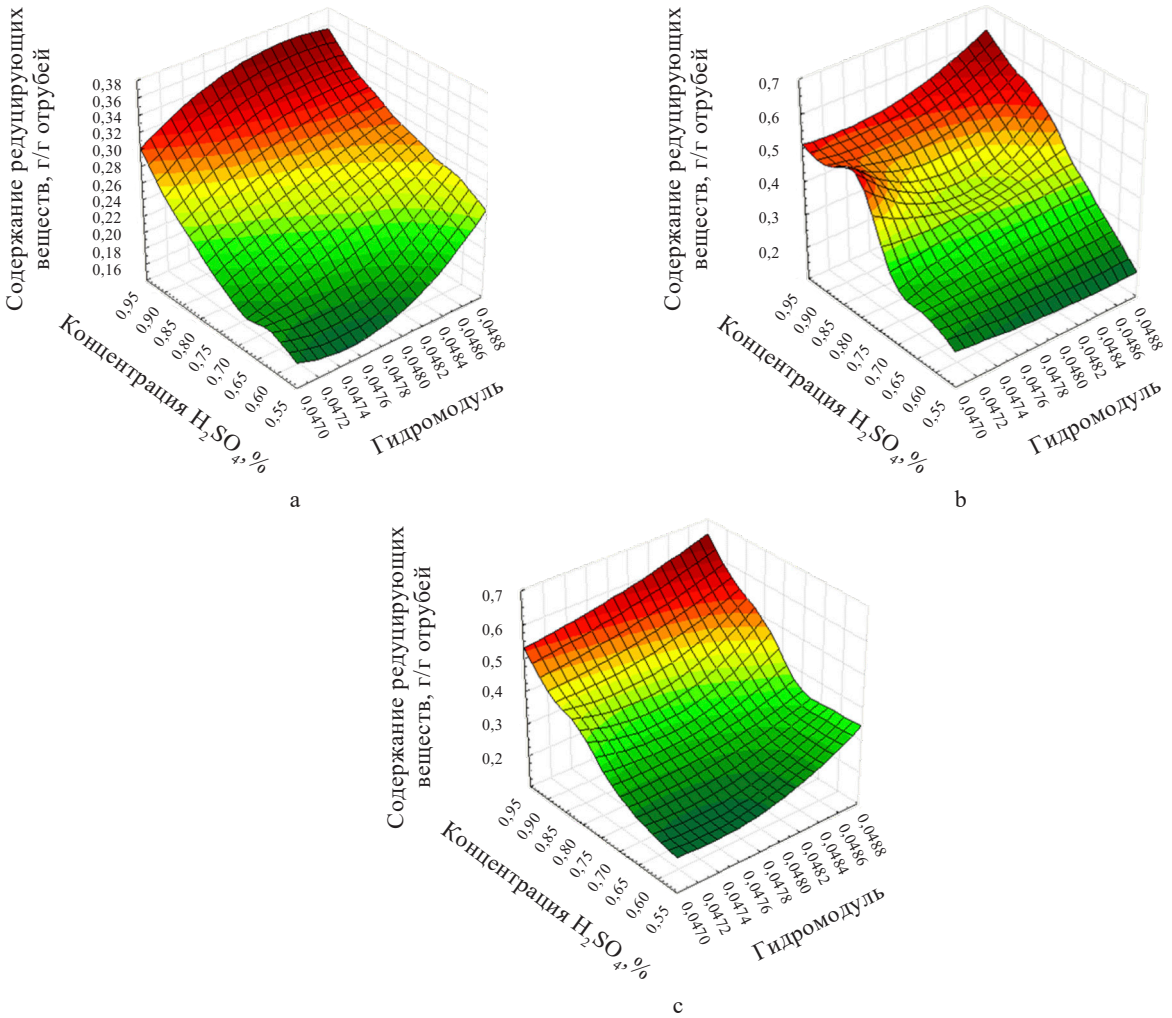

Рисунок 5. Зависимость содержания редуцирующих веществ механически активированных пшеничных отрубей от концентрации серной кислоты и гидромодуля в результате высокотемпературного гидролиза в течение 30 (a), 45 (b) и мин 60 (c) (T = 130 °C)

Figure 5. Effect of the concentration of sulfuric acid and hydromodule on the content of reducing substances in mechanically activated wheat bran as a result of high-temperature hydrolysis at 130°C after 30 min (a), 45 min (b), and 60 min (c)

Таблица 3. Состав пшеничных отрубей при химическом гидролизе

Table 3. Composition of wheat bran during chemical hydrolysis

Определяемый показатель	Нормативная документация на методы испытания	Пшеничные отруби	
		Нативные	Химически обработанные
Массовая доля сырого протеина, %	ГОСТ 13496.4-93	14,70 ± 0,46	14,26 ± 0,45
Массовая доля сырой клетчатки, %	ГОСТ 31675-2012	8,5 ± 0,4	6,9 ± 0,3
Массовая доля легкогидролизуемых углеводов (крахмала) на а.с.в., %	ГОСТ 26176-91	17,8 ± 2,8	3,6 ± 0,8
Аминный азот, мг/г отрубей	ОФС.1.2.3.0022.15	2,24 ± 0,12	2,46 ± 0,09

целлюлозном сырье, к которому относятся пшеничные отруби, процессы кислотного или ферментативного разложения полимеров будут происходить неравномерно.

В следующей серии исследований определили качественный и количественный состав углеводов пшеничных отрубей хроматографическим методом после их химической предобработки. Определение изменения качественного и количественного состава углеводов и растворимых белковых соединений на различных технологических этапах конверсии углеводсодержащего сырья значимо для

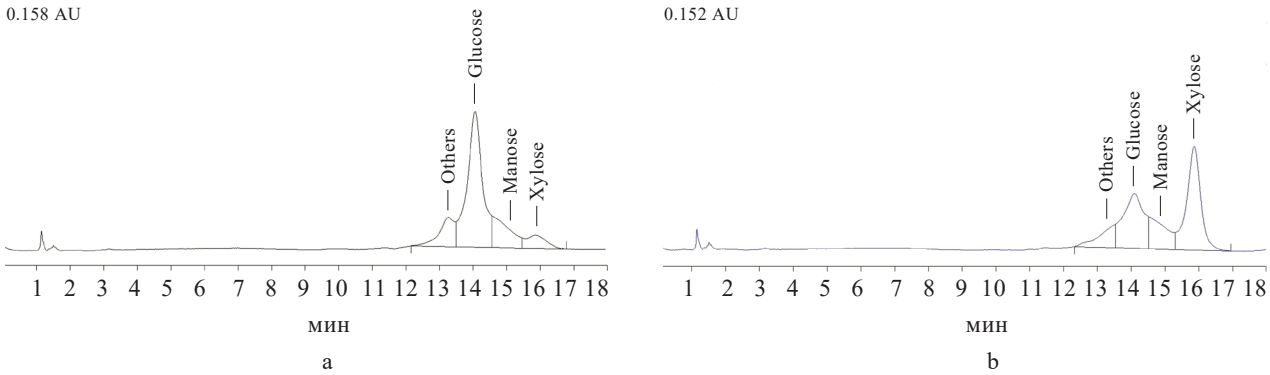

Рисунок 6. Хроматограмма экстракта нативных пшеничных отрубей (a) и их гидролизата (b)

Figure 6. Chromatogram of native wheat bran extract (a) and its hydrolyzate (b)

Таблица 4. Содержание моносахаридов экстрактов нативных и гидролизованных пшеничных отрубей

Table 4. Monosaccharides in extracts of native and hydrolyzed wheat bran

Состав моносахаридов, мг/г отрубей	Пшеничные отруби	
	Нативные	Гидролизованные
Дисахариды	Нет	Нет
Глюкоза	28,4	54,0
Манноза	5,3	25,4
Пентозы (в пересчете на ксилозу)	2,1	78,2
Другие моносахариды	4,0	1,3

дальнейшего производства не только кормов животноводческой отрасли, но и кормового белка и биоэтанола.

Содержание гексоз (глюкоза+галактоза, манноза, сумма пентоз, сумма дисахаридов) определяли ВЭЖХ как признанным методом для анализа качественного и количественного состава моносахаридов. Из анализа полученных хроматограмм (рис. 6) определили наличие в гидролизатах глюкозы, ксилозы и незначительного количества маннозы, что характерно для моносахаридного состава пшеничных отрубей.

Результаты обработки хроматограмм в программе Мультихром (ОАО «Амперсенд») представлены в таблице 4. При высокотемпературной трансформации пшеничных отрубей увеличивается содержание глюкозы в 1,9 раза, что составило 54,0 мг/г, манноз – в 4,8 раза, что составило 25,4 мг/г. Наибольшее изменение определено для пентоз (в пересчете на ксилозу) – в 37,2 раза, их уровень в гидролизованных отрубях составил 78,2 мг/г. Результаты согласуются с данными авторов A. A. Gil-Montenegro и др., которые получили из дробины гидролизаты, обогащенные ксилозой [23].

В образцах обнаружили другие моносахариды неустановленной природы. Предположительно, галактозу. В процессе гидролиза их содержание уменьшалась в 3,1 раза в отличие от других определяемых моносахаридов. Лактоза и другие дисахариды не обнаружены ни в одном образце.

Выводы

Механическая активация пшеничных отрубей способствует трансформации растительных полисахаридов при химическом гидролизе.

Установили параметры химического гидролиза фракции пшеничных отрубей 100 мкм с наибольшим образованием редуцирующих веществ 640 мг/г отрубей: гидромодуль 1:10, температура 120 °C, продолжительность 45 мин, концентрация серной кислоты 0,9 %.

Определили увеличение в гидролизатах пшеничных отрубей моносахаридов: глюкозы, маннозы и пентозы. Такие изменения выражены для пентоз (78,2 мг/г) – увеличение в 37,2 раза. Дисахариды в экстрактах и гидролизатах пшеничных отрубей не установлены.

Химическая предобработка пшеничных отрубей неорганическими кислотами может являться одним из этапов производства пентоз, в том числе сахарозаменителя – ксилозы.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что конфликта интересов нет.

Contribution

All the authors bear equal responsibility for the content of the article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Clifton-Brown J, Harfouche A, Casler MD, Jones HD, Macalpine WJ, Murphy-Bokern D, *et al.* Breeding progress and preparedness for mass-scale deployment of perennial lignocellulosic biomass crops switchgrass, miscanthus, willow and poplar. GCB Bioenergy. 2018;11(1):118–151. https://doi.org/10.1111/gcbb.12566

2. Wang L, Tian Y, Chen Y, Chen J. Effects of acid treatment on the physicochemical and functional properties of wheat bran insoluble dietary fiber. Cereal Chemistry. 2022;99(2):343–354. https://doi.org/10.1002/cche.10494

3. Jia M, Chen J, Liu X, Xie M, Nie S, Yi C, *et al.* Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation. Food Hydrocolloids. 2019;94:468–474. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.03.047

4. Bhatia L, Sharma A, Bachheti RK, Chandel AK. Lignocellulose derived functional oligosaccharides: production, properties, and health benefits. Preparative Biochemistry and Biotechnology. 2019;49(8):744–758. https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1608446

5. Awasthi MK, Tarafdar A, Gaur VK, Amulya K, Narisetty V, Yadav DK, *et al.* Emerging trends of microbial technology for the production of oligosaccharides from biowaste and their potential application as prebiotic. International Journal of Food Microbiology. 2022;368. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109610

6. Bhatia R, Lad JB, Bosch M, Bryant DN, Leak D, Hallett JP, *et al.* Production of oligosaccharides and biofuels from *Miscanthus* using combinatorial steam explosion and ionic liquid pretreatment. Bioresource Technology. 2021;323. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124625

7. Procentese A, Raganati F, Olivieri G, Russo ME, Rehmann L, Marzocchella A. Deep Eutectic Solvents pretreatment of agro-industrial food waste. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2018;11. https://doi.org/10.1186/s13068-018-1034-y

8. Wen Y, Niu M, Zhang B, Zhao S, Xiong S. Structural characteristics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments. LWT. 2017;75:344–351. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.09.012

9. Bashashkina EV, Souyasov NA, Shakir IV, Panfilov VI. Bioconversion of soluble coffee production waste into fodder products. Ecology and Industry of Russia. 2011;(1):18–19. (In Russ.). [Биоконверсия отходов производства растворимого кофе в продукты кормового назначения / Е. В. Башашкина [и др.] // Экология и промышленность России. 2011. № 1. С. 18–19.].

10. Smirnova VD, Kisseleva RYu, Shakir IV, Panfilov VI. A biotechnological way of processing of waste products of soya-protein manufacture. Ecology and Industry of Russia. 2010;(5):14–16. (In Russ.). [Биотехнологический путь переработки отходов производства соевого белка / В. Д. Смирнова [и др.] // Экология и промышленность России. 2010. № 5. С. 14–16.].

11. Vasil′ev AV, Panfilov VI, Shakir IV, Afana′sv AV, Tsygankov MA. Acid and enzymatic hydrolysis of waste from the brewing. Chemical Technology. 2007;8(1):17–21. (In Russ.). [Кислотный и ферментативный гидролиз отходов пивоваренной промышленности / А. В. Васильев [и др.] // Химическая технология. 2007. Т. 8. № 1. С. 17–21.].

12. Taherzadeh MJ, Karimi K. Acid-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: a review. BioResources. 2007;2(3):472–499.

13. Bušić A, Marđetko N, Kundas S, Morzak G, Belskaya H, Šantek MI, *et al.* Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: A review. Food Technology and Biotechnology. 2018;56(3):289–311. https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546

14. Galbe M, Wallberg O. Pretreatment for biorefineries: A review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2019;1(1). https://doi.org/10.1186/s13068-019-1634-1

15. Weiss ND, Felby C, Thygesen LG. Enzymatic hydrolysis is limited by biomass-water interactions at high-solids: Improved performance through substrate modifications. Biotechnology for Biofuels and Bioproducts. 2019;12(3). https://doi.org/10.1186/s13068-018-1339-x

16. Osipov DO, Bulakhov AG, Korotkova OG, Rozhkova AM, Duplyakin EO, Afonin AV, *et al.* Effect of the milling of wheat bran on its properties and reactivity during biocatalytic conversion. Catalysis in Industry. 2017;9(1):77–84. https://doi.org/10.1134/S2070050417010111

17. Amezcua-Allieri MA, Durán TS, Aburto J. Study of chemical and enzymatic hydrolysis of cellulosic material to obtain fermentable sugars. Journal of Chemistry. 2017;2017. https://doi.org/10.1155/2017/5680105

18. Junejo SA, Geng H, Wang N, Wang H, Ding Y, Zhou Y, *et al.* Effects of particle size on physicochemical and *in vitro* digestion properties of *durum* wheat bran. International Journal of Food Science and Technology. 2019;54(1):221–230. https://doi.org/10.1111/ijfs.13928

19. Onipe OO, Beswa D, Jideani AIO. Effect of size reduction on colour, hydration and rheological properties of wheat bran. Food Science and Technology International. 2017;37(3):389–396. https://doi.org/10.1590/1678-457X.12216

20. Pogorelova NA, Gavrilova NB, Rogachev EA, Schetinina EM. Determining the effectiveness of wheat bran conversion methods for use in food technology. Storage and Processing of Farm Products. 2020;(1):48–57. (In Russ.). https://doi.org/10.36107/spfp.2020.228

21. Lomovsky OI, Lomovskiy IO, Orlov DV. Mechanochemical solid acid/base reactions for obtaining biologically active preparations and extracting plant materials. Green Chemistry Letters and Reviews. 2017;10(4):171–185. https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1339832

22. Barbosa FC, Silvello MA, Goldbeck R. Cellulase and oxidative enzymes: New approaches, challenges and perspectives on cellulose degradation for bioethanol production. Biotechnology Letters. 2020;42(6):875–884. https://doi.org/10.1007/s10529-020-02875-4

23. Gil-Montenegro AA, Arocha-Morales JS, Rojas-Pérez LC, Narváez-Rincón PC. Process simulation for xylitol production from brewer's spent grain in a Colombian biorefinery. Part 1: Xylose production from arabinoxilans extracted by the alkaline pretreatment of BSG. Ingeniería e Investigación. 2019;39(1):15–23. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v39n1.70080