

Влияние условий физической обработки на изменение химического состава пивной дробины

И. Н. ГРИБКОВА, В. И. КОЗЛОВ, О. А. БОРИСЕНКО

Всероссийский научно-исследовательский институт пивоваренной, безалкогольной и винодельческой промышленности – филиал «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН, ул. Россолимо, 7, Москва, 119021, Российская Федерация

Резюме. Исследования проводили с целью изучения эффективности переработки пивной дробины физическими методами (атмосферное, избыточное давление, ультразвук) на основе оценки концентрации соединений католитных экстрактов. В качестве экстрагента использовали электрохимически активированную воду (католит, pH=9,4). Эффективность воздействия контролировали путем определения концентрации полифенольных, азотистых и углеводных соединений католитных экстрактов дробины аналитическими методами. Фенольные соединения сильнее всего накапливались в экстрактах при обработке в течение 3 ч при t=50 °C и атмосферном давлении – 4,1 мг/г дробины, что на 22,0...44,0 % выше чем в экстрактах, полученных при избыточном давлении и ультразвуке, растворимого азота при обработке в течение 6 ч при t=50 °C и атмосферном давлении (концентрация возрастает на 22 %, по сравнению с 3 ч обработкой). При избыточном давлении 0,5...1,0 атм и длительности обработки 30 мин выход растворимого азота находился в диапазоне 235,1...247,1 мг/г дробины. Увеличение длительности обработки до 1 ч приводило к снижению концентрации азота до 192,8...195,0 мг/г дробины, что связано с образованием продуктов реакции меланоилинообразования в условиях повышенных температур. Условия воздействия избыточного давления 0,5...1,0 атм обеспечивают достижение наибольшей концентрации β-глюкана (4,9...9,0 мг/г дробины), накопление которого прямо пропорционально продолжительности обработки и обратно пропорционально величине избыточного давления. Самый высокий выход гексоз и пентоз отмечен при обработке в течение 30 мин в условиях избыточного давления 1,0 атм. С увеличением частоты и продолжительности обработки ультразвуком содержание фенольных соединений и растворимого азота снижалось. Многофакторный корреляционный анализ позволил выявить наибольшее влияние продолжительности и температуры воздействия на концентрацию органических соединений экстрактов пивной дробины.

Ключевые слова: пивная дробина, физическая обработка, фенольные соединения, некрахмальные полисахариды, растворимый азот

Сведения об авторах: И. Н. Грибкова, кандидат технических наук, старший научный сотрудник (e-mail: institut-beer@mail.ru); В. И. Козлов, младший научный сотрудник; О. А. Борисенко, ведущий инженер-исследователь

Для цитирования: Грибкова И. Н., Козлов В. И., Борисенко О. А. Влияние условий физической обработки на изменение химического состава пивной дробины // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 4. С. 54–60. doi: 10.53859/02352451_2023_37_4_54.

Influence of physical treatment conditions on the change in the chemical composition of brewer's grains

I. N. Gribkova, V. I. Kozlov, O. A. Borisenko

All-Russian Research Institute of Brewing, Non-Alcoholic and Wine-making Industry - a branch of the «The Federal Scientific Center for Food Systems named after VM Gorbатов», ul. Rossolimo, 7, Moskva, 119021, Russian Federation

Abstract. The research aimed to study the efficiency of processing brewer's grains by physical methods (atmospheric, overpressure, ultrasound) based on the assessment of the concentration of compounds of catholyte extracts. Electrochemically activated water (catholyte, pH=9.4) was used as an extractant. The effectiveness of exposure was controlled by determining the concentration of polyphenolic, nitrogenous and carbohydrate compounds of catholyte extracts of brewer's grains by analytical methods. Phenolic compounds accumulated most of all in extracts during treatment for 3 hours at t=50 degrees Celsius and atmospheric pressure – 4.1 mg/g of brewer's grain, which is 22.0-44.0% higher than in extracts obtained at excess pressure and ultrasound, soluble nitrogen during treatment for 6 hours at t=50 degrees Celsius and atmospheric pressure (the concentration increases by 22%, compared with 3 hours of treatment). At an overpressure of 0.5-1.0 atm and a treatment time of 30 min, the yield of soluble nitrogen was in the range of 235.1-247.1 mg/g of brewer's grain. An increase in the duration of treatment to 1 hour led to a decrease in the nitrogen concentration to 192.8-195.0 mg/g of grains, which is associated with the formation of reaction products of melanoilin formation at elevated temperatures. Conditions of exposure to excess pressure of 0.5-1.0 atm ensure the achievement of the highest concentration of β-glucan (4.9-9.0 mg/g of grains), the accumulation of which is directly proportional to the duration of treatment and inversely proportional to the amount of excess pressure. The highest yield of hexoses and pentoses was observed during treatment for 30 min under an overpressure of 1.0 atm. With an increase in the frequency and duration of sonication, the content of phenolic compounds and soluble nitrogen decreased. Multivariate correlation analysis made it possible to reveal the greatest influence of the duration and temperature of exposure on the concentration of organic compounds in brewer's grain extracts.

Key words: brewer's grains; physical treatment; phenolic compounds; non-starch polysaccharides; soluble nitrogen.

Author Details: I. N. Gribkova, Cand. Sc. (Tech.), senior research fellow (e-mail: institut-beer@mail.ru); V.I. Kozlov, junior research fellow; O. A. Borisenko, leading research engineer.

For citation: Gribkova IN, Kozlov VI, Borisenko OA [Influence of physical treatment conditions on the change in the chemical composition of brewer's grains]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023;37(4):54–60. Russian. doi: 10.53859/02352451_2023_37_4_54.

Пивоваренная дробина относится к возобновляемым отходам пивоваренного производства, которая состоит из оболочек зернового сырья: зерновой шелухи, околоплодника, семенной оболочки и твердых частей эндосперма [1, 2]. Причина повышенного внимания, уделяемого дробине, связана с ее химическим составом. Она содержит белки (пептоны, пептиды, аминокислоты) – 14,2...35,4 % а.с.в.; липиды (воска, жирные кислоты) – 3,0...13,0 % а.с.в.; растворимые волокна (углеводные соединения, образующие гели) – 50,0...74,0 % а.с.в.; углеводы (нерастворимые) – около 46,0; лигнин – 10...28 %

а.с.в.; арабиноксиланы – около 40,0 % а.с.в.; зола (минеральные элементы) – 1,2...6,0 % а.с.в. [3, 4, 5]. В состав дробины также входят фосфор (6000 мг/кг), кальций (3600 мг/кг) и магний (1900 мг/кг) [2], витамины – биотин (0,1 мг/кг), ниацин (44 мг/кг), холин (1800 мг/кг), фолиевая кислота (0,2 мг/кг), пантотеновая кислота (8,5 мг/кг), рибофлавин (1,5 мг/кг), тиамин (0,7 мг/кг) и пиридоксин (0,7 мг/кг) [6, 7].

Среди углеводов выделяют пищевые волокна разной растворимости: β-глюканы, пектиновые полисахариды, арабиногалактаны и ксиланоглюканы от-

носят к растворимой фракции, а лигнин, целлюлозу и галактоманнаны – к нерастворимой [7]. По уточненным данным, 28,3 % гемицеллюлозы, 16,2 % целлюлозы и 7,3 % лигнина, пектиновых веществ, солей, золы в составе нерастворимых углеводов обуславливают жесткие (каркасные) структуры дробины [8]. Следовательно, по степени извлечения как соединений в целом, так и их структурных единиц, можно косвенно судить о направлении воздействия различных факторов при переработке дробины.

В зависимости от целей обработки, преследующих выделение конкретных полезных органических соединений или модификации структуры дробины (например, для использования в качестве сорбента), лигно-целлюлозный субстрат подвергают экстремальным воздействиям (повышенных температур, давления, ультразвука, микроволновой обработки, химических веществ и др.) [9, 10, 11].

Необходимо отметить, что принципы обработки целлюлозно-лигнинной биомассы дробины в пищевых целях должны основываться на экологически безопасных реагентах и способах переработки, не приводящих к контаминации выделяемого лигниноцеллюлозного субстрата. При этом современные технологии предусматривают применение неорганических кислот, в результате которого основания и щелочи, остающиеся в переработанной дробине, делает ее использование в пищевой отрасли невозможным и экономически затратным [4].

Цель исследований – изучить влияние условий физической обработки на растительную матрицу дробины путем определения содержания различных групп соединений (углеводных, азотистых и фенольных) в католитных экстрактах.

Для ее достижения решали следующие задачи: определить перечень органических соединений, связанных со структурой целлюлозно-лигнинного комплекса, подлежащих анализу; сравнить несколько методов физической обработки для контроля изменения структуры дробины на основе оценки концентрации соединений в экстрактах дробины.

Результаты этих исследований необходимы для разработки технологии сорбционного материала на основе вторичных сырьевых ресурсов пивоваренной промышленности, что служит одной из приоритетных задач экологизации отрасли.

Условия, материалы и методы. В качестве объекта исследования использовали экстракты солодовой дробины, полученной после затирания отечественного светлого ячменного солода при приготовлении солодового сусла, со степенью помола 85 % (мелкий помол) и 15 % (крупка). После фильтрации ее промывали под проточной водой от остатков редуцирующих, растворимых азотистых и прочих веществ, обсушивали от остаточной влаги, упаковывали в полиэтиленовые пакеты с Zip-застежкой и хранили в морозильной камере при $(-4\pm 2)^\circ\text{C}$ в течение периода исследования (7 дней).

Обработку дробины проводили с использованием электрохимически активированной воды (ЭХА-вода) с $\text{pH}=9,4$, получаемой на установке СТЭЛС, физико-химическими способами: в условиях атмосферного

давления в течение 3 и 6 ч, условиях повышенного давления 0,5 и 1,0 атм (автоклавирование) в течение 0,5 и 1,0 ч, ультразвуковая обработка с частотой 40 и 60 кГц (ультразвуковое термостатирование) в течение 0,5 и 1,0 ч. Давление 0,5 атм соответствует температуре 110°C , а 1,0 атм – 120°C .

Для анализа использовали экстракт обработанной дробины, предварительно подвергнутый центрифугированию (3000 об/мин) или фильтрации для достижения прозрачности. Общее содержание полифенолов (ОПФ) определяли по методу Еруманиса (ГОСТ 34798-2021); растворимого азота (пептиды, аминокислоты) (РА) – по методу Кьельдаля (ГОСТ 34789-2021); β -глюкана (Гл) – по ГОСТ 34799-2021; редуцирующих сахаров (РВ) (гексоз (С6) и пентоз (С5)) – по ГОСТ 34799-2021 с использованием калибровочных графиков, построенных на основе зависимости изменения концентрации глюкозы и ксилозы от оптической плотности окрашенного комплекса конкретного сахара и 3,5-динитросалициловой кислоты. Статистические данные обрабатывали в программе Statistics (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA, 2006).

Эксперименты проводили в 5...6-кратной повторности с доверительной вероятностью $P\geq 95\%$.

Результаты и обсуждение. Условия извлечения влияли на содержание органических соединений экстрактов, и зависимость в случае каждого класса соединения своя. Фенольные соединения дробины представлены гидроксикоричными кислотами (феруловой, *p*-кумаровой), гидроксibenзойными кислотами (синаповой, кофейной, сиреневой), а также кверцетином, рутином, катехином и эпикатехином [12]. Поскольку условия щелочного гидролиза способствуют разрушению структуры лигнина и гемицеллюлозы, то этот процесс приводит к высвобождению фенольных кислот и прочих фенольных соединений в зависимости от природы щелочного реагента. В нашем случае, в качестве щелочного агента выступает католит – электрохимически обработанная вода, которая имела щелочной pH , связанный с накоплением отрицательного заряда окислительно-восстановительного потенциала. Поэтому, по сути, он участвует в реакциях восстановления [13]. В свою очередь, фенольные соединения, этерифицированные с лигнином, в условиях избытка H^+ , разрывают эфирные и карбонильные связи и приобретают свободную форму [14].

На первый взгляд, учитывая три влияющих фактора (давление, температура и продолжительность обработки), наибольшим образом на эффективность извлечения фенольных соединений влияла продолжительность обработки. Если исходить из концентрации получаемых в экстрактах фенольных соединений, то наиболее эффективны атмосферное давление, продолжительности обработки 3 ч и $t=50^\circ\text{C}$ – содержание полифенолов достигает уровня 4,1 мг/г дробины, что на

Таблица 1. Содержание органических соединений в экстрактах дробины, обработанной при разном давлении в среде ЭХА-воды, мг/г а.с.в. дробины

Соединение	Давление					
	атмосферное		избыточное, атм			
			0,5		1,0	
	3 ч	6 ч	0,5 ч	1,0 ч	0,5 ч	1,0 ч
ОПФ	4,1 $\pm$ 0,3*	2,3 $\pm$ 0,2	2,9 $\pm$ 0,2	2,6 $\pm$ 0,2	3,2 $\pm$ 0,2	2,6 $\pm$ 0,2
РА	151,9 $\pm$ 6,1	184,9 $\pm$ 7,4	235,3 $\pm$ 9,4	192,8 $\pm$ 7,7	247,1 $\pm$ 9,9	195,0 $\pm$ 7,8
Гл	4,7 $\pm$ 0,4	4,2 $\pm$ 0,4	6,2 $\pm$ 0,5	9,0 $\pm$ 0,8	4,9 $\pm$ 0,4	7,5 $\pm$ 0,7
РВ	340,0 $\pm$ 34	464,0 $\pm$ 46	478,0 $\pm$ 48	428,6 $\pm$ 43	547,2 $\pm$ 55	500,0 $\pm$ 50
С5	339,2 $\pm$ 34	340,0 $\pm$ 34	410,4 $\pm$ 41	375,0 $\pm$ 37	472,7 $\pm$ 47	428,3 $\pm$ 43

*($M\pm m$)

22,0...44,0 % выше уровней, отмеченных при других условиях (табл. 1). Опираясь на ранее полученные данные [12], можно предположить, что фенольные соединения лабильны и, например, более длительная выдержка при температуре 50 °С приводит к их окислению и снижению конечной концентрации в экстрактах.

Растворимый азот включает в себя пептиды гордеинов, глютелинов, глобулинов и альбуминов, связанные с арабиноксиланами [15], свободные и связанные формы аминокислот, ассоциированные с лигнинами [16]. По этой причине, щелочные условия католита также позволяют добиться увеличения выхода растворимого азота при гидролизе связей арабиноксиланов и лигнина. Условия атмосферного давления (при температуре среды 50 °С) при длительной выдержке (6 ч) увеличивают выход растворимого азота, по сравнению с его выходом при тех же условиях, но в течение 3 ч. Избыточное давление (0,5...1,0) атм, что соответствует температуре среды (110...120) °С соответственно, продолжительность выдержки 30 мин способствуют максимумам выхода растворимого азота в диапазоне 235,1...247,1 мг/г дробины, тогда как увеличение выдержки до 1 ч в условиях избыточного давления снижает уровни выхода до 192,8...195,0 мг/г дробины, что связано с реакциями термораспада [17].

β-глюкан локализуется в твердых частях эндосперма зерна, который не был до конца растворен при солодоращении [1]. В наших исследованиях в условиях атмосферного давления разная продолжительность выдержки дробины в католите не оказывала решающего воздействия на концентрацию некрахмального полисахарида, она оставалась на одном уровне в пределах погрешности метода. В условиях избыточного давления (0,5...1,0) атм величина этого показателя была пропорциональна времени выдержки и обратно пропорциональна величине избыточного давления. Иными словами, условия избыточного давления в 1,0 атм, что соответствует температуре 120 °С приводят к высвобождению молекул некрахмального декстрина наравне с белковыми соединениями.

На выход редуцирующих веществ (гексоз) наибольшее влияние оказывали условия избыточного давления 1,0 атм и продолжительность выдержки 30 мин (см. табл. 1). Увеличение длительности выдержки при равном избыточном давлении приводит к потере или деструкции гексоз. При этом обработка дробины католитом в условиях атмосферного давления в течение 6 ч вызывает повышение доли извлечения гексоз, по сравнению с выдержкой в течение 3 ч, на 36 %. В отношении пятичленных редуцирующих веществ максимальный выход так же отмечали в условиях избыточного давления 1 атм при длительности выдержки 30 мин.

Таблица 2. **Содержание органических соединений в экстрактах дробины, обработанной в условия ультразвука и ЭХА-воды при 50 °С, мг/г а.с.в. дробины**

Соединение	40 кГц		60 кГц	
	0,5 ч	1 ч	0,5 ч	1,0 ч
ОПФ	2,9±0,2*	2,3±0,2	1,8±0,1	1,2±0,1
РА	201,5±8,1	180,7±7,2	175,3±7,0	162,3±6,5
Гл	9,0±0,8	5,5±0,5	6,2±0,5	4,2±0,4
РВ	С6	357,1±35	410,7±41	425,0±43
	С5	321,4±32	357,1±36	364,3±36
				457,1±45

*(M±m)

Ультразвуковая обработка связана с возбуждением колебаний давления, что приводит к возникновению микроскопических пузырьков, нестабильная природа которых обуславливает возникновение сил сдвига,

а также повышение температуры в среде. Явления кавитации способны разрушать химические связи, воздействовать на структуру молекул органических соединений [18]. Увеличение частоты ультразвука и продолжительности обработки способствовало снижению содержания фенольных соединений вследствие их лабильности. Например, повышение частоты ультразвука на 20 кГц привело к почти двукратному снижению величины этого показателя (табл. 2). Одновременно повышение продолжительности обработки дробины на 30 мин способствовало снижению уровня растворимого азота при частоте 60 кГц на 7 %, 40 кГц – 10 %.

Содержание общих полифенолов, экстрагируемых католитом при 40 кГц в течение 0,5 ч, сопоставимо с величиной этого показателя, полученной при избыточном давлении 0,5 атм и 0,5 ч экстракции. Обработка в течение 3 ч в условиях атмосферного давления при 50 °С приводила к росту содержания фенольных соединений в католитных экстрактах, по сравнению с максимальным количеством полифенолов, извлекаемых при 40 кГц, на 41 %. Воздействие избыточного давления 0,5...1,0 атм в течение 1,0 ч позволяло извлекать на 10 % меньше фенольных соединений, по сравнению с 0,5 ч ультразвуковой обработкой с частотой 40 кГц, а 1,0 атм в течение 0,5 ч – на 10 % больше. Обработка ультразвуком с частотой 60 кГц в течение 0,5...1,0 ч извлекала наименьшее количество общих полифенолов, содержание которых в экстракте было на 48...71 % ниже, чем в вариантах с атмосферным и избыточным давлением.

Наибольшую экстракцию растворимого азота среди изученных видов воздействия обеспечивает избыточное давление 1,0 атм в течение 0,5 ч. При этом его выход увеличивается, по сравнению с воздействием ультразвуком 40 кГц в течение такого же времени, на 23 %. Повышение длительности обработки при 1,0 атм до 1,0 ч снижает выход растворимого азота, по сравнению с 0,5 ч экстракцией в условиях 40 кГц, на 3 %. Экстракция растворимого азота при 60 кГц в течение 0,5...1,0 ч менее эффективна, по сравнению с обработкой ультразвуком с частотой 40 кГц, на 10...13 %. Наименьшее его извлечение происходит при атмосферном давлении и 50 °С в течение 3 ч, содержание растворимого азота в экстракте в этом варианте на 6...38,5 % ниже, чем при прочих рассматриваемых воздействиях.

Экстракция католитом при частоте ультразвука 40 кГц за 0,5 ч и при избыточном давлении 0,5 атм в течение 1,0 ч позволяет извлечь наибольшее количество β-глюкана, содержание которого на 20...114 % выше, чем при остальных условиях. Экстракции под действием ультразвука с частотой 60 кГц за 1,0 ч, а также при атмосферном давлении и температуре 50 °С

в течение 6 ч обеспечивает сопоставимые результаты по содержанию некрахмального полисахарида в католитных экстрактах, которое на 11...53 % ниже чем при остальных изучаемых вариантах воздействия.

Экстракция шестичленных и пятичленных сахаров также наиболее эффективна

на при избыточном давлении 1,0 атм. При таком воздействии в течение 0,5 ч выход шестичленных сахаров возрастает, по сравнению с другими рассматриваемыми условиями, на 9...38 %, пятичленных – на 9...32 %. На-

меньшее количество сахаров экстрагируется католитом при атмосферном давлении и 50 °С за 3 ч обработки – ниже относительно остальных рассматриваемых вариантов соответственно на 17...38 % и 0,2...28 %.

Увеличение частоты ультразвука на 20 кГц приводит к ухудшению извлечения большинства рассматриваемых органических соединений (общих полифенолов, растворимого азота и β-глюкана). Исключение составляют редуцирующие сахара, содержание которых в экстракте этом варианте приближается к уровню, достигаемому при обработке под избыточным давлением.

Поскольку однозначного влияния того или иного фактора на выход органических соединений при обработке давлением не было установлено, полученные данные подвергли многофакторному корреляционно-регрессионному анализу. По его результатам фактор, непосредственно воздействующий на эффективность извлечения полифенольных соединений и β-глюкана, отсутствует, поскольку парные коэффициенты корреляции не значимы, то есть меньше 0,70 (табл. 3). На извлечение растворимого азота значимое влияние оказывает фактор температуры ($R=0,73$), редуцирующих веществ – давление ($R=0,88$) и температура, что свидетельствует о большей эффективности использования избыточного давления.

Таблица 3. Парные коэффициенты корреляции в условиях изменения давления

Показатель	Давление (q), атм	Время обработки (t), ч	Температура (t), °С
Y (ОПФ)	-0,21	-0,15	-0,29
Давление, атм	1	-0,77	0,92
Продолжительность обработки, ч		1	-0,88
Y (РА)	0,68	-0,58	0,73
Давление, атм	1	-0,77	0,92
Продолжительность обработки, ч		1	-0,88
Y (Гл)	0,42	-0,58	0,63
Давление, атм	1	-0,77	0,92
Продолжительность обработки, ч		1	-0,88
Y (РВ (С6+С5))	0,88	-0,55	0,79
Давление, атм	1	-0,77	0,92
Продолжительность обработки, ч		1	-0,88

Изучение корреляционных характеристик зависимостей показало, что на извлечение фенольных соединений оказывают совместное влияние продолжительность и температура воздействия, причем последний фактор наиболее значим, судя по коэффициенту эластичности E (табл. 4). Близость общих коэффициентов корреляции и детерминации к единице, указывает на точную оценку влияния всех рассматриваемых параметров на количественные изменения фенольных соединений.

Наибольшее влияние на извлечение β-глюкана оказывают давление и температура ($R=0,94$), что, в отношении давления, подтверждается другими исследователями [19]. При этом величины общих коэффициентов корреляции и детерминации указывают на то, что, по крайней мере 42 % факторов остались не учтенными. Это, на наш взгляд, может свидетельствовать о наличии

сложной структуры нерастворенного эндосперма, в которой локализуется β-глюкан, связанный с белково-фенольным комплексом.

На долю давления, температуры и продолжительности обработки, как факторов, значимо влияющих на извлечение растворимого азота, приходится 56 % воздействия, тогда как 44 % факторов остаются неучтенными (см. табл. 4). На наш взгляд, это обусловлено сложным строением белковых молекул. В пользу этого свидетельствуют результаты исследований, подтверждающих влияние последовательности аминокислот и прочих органических соединений на устойчивость ковалентных, гидрофобных, ионных и прочих взаимодействий между белковыми соединениями и прочими органическими молекулами в структуре дробины [20].

Ключевые факторы воздействия на редуцирующие углеводы, которые относятся к целлюлозно-лигнинному комплексу дробины – продолжительность обработки и температура. Известно [11], что температурный фактор значим в отношении сохранности гидролизата сахаров (шести- и пятичленных), возникающих при физической обработке гемицеллюлоз и целлюлоз структуры дробины. Соответственно, продолжительность воздействия может негативно повлиять на структуру редуцирующих соединений при их извлечении.

Для понимания того, на какие органические соединения направлено действие физических способов переработки, необходимо представлять их взаимодействия при выщелачивании из структуры дробины. Поэтому на основании полученных результатов были определены взаимосвязи между органическими соединениями, выделяемыми в жидкую среду при обработке. Установлена взаимосвязь ($R=0,73$) между

выделением из растительной матрицы дробины растворимого азота и шестичленных углеводов соединений (табл. 5), что коррелирует с данными о локализации некрахмальных полисахаридов в структуре дробины [1]. Значимых парных коэффициентов корреляции для декстринов β-глюкана, общих полифенолов и прочих органических соединений не обнаружено ($R<0,7$).

Анализ частных коэффициентов корреляции, расширяющих возможности оценки взаимосвязей между органическими соединениями, которые выделяются в результате обработки (табл. 6) показал, что экстракция β-глюкана ассоциирована с высвобождением растворимого азота и углеводов-гексоз (фрагменты арабиноксиланов, гемицеллюлоз, нерастворенного крахмала и пр.) ($R=0,80$), а также комплекса углеводов (редуцирующие соединения пяти- и шестичленные) ($R=0,70$). Такие результаты согласуются с данными о

Таблица 4. Корреляционные характеристики зависимостей

Показатель	ОПФ	РА	Гл	РВ
Частный коэффициент корреляции	q-t/ОПФ (-0,83) q-t/ОПФ (0,92) t-t/ОПФ (0,98)	q-t/РА (-0,63) q-t/РА (0,86) t-t/РА (-0,83)	q-t/Гл (-0,72) q-t/Гл (0,94) t-t/Гл (-0,82)	q-t/РВ (-0,74) q-t/РВ (0,78) t-t/РВ (-0,89)
Коэффициент эластичности ($E > 1 $)	$E(t) = (-1,84)$	$E < 1 $	$E(t) = (1,54)$	$E < 1 $
Коэффициент корреляции общий	0,99	0,75	0,76	0,92
Коэффициент детерминации общий	0,98	0,56	0,58	0,84
Доля неучтенных факторов, %	2	44	42	16

Таблица 5. Парные коэффициенты корреляции между органическими соединениями

Показатель	ОПФ	РА	С6	С5
У (содержание β-глюкана)	0,11	0,21	-0,14	-0,27
ОПФ	1	0,24	-0,10	-0,24
РА		1	0,73	0,43
С6			1	0,70
	РА	Гл	С6	С5
У (содержание ОПФ)	0,24	0,11	-0,10	-0,24
РА	1	0,21	0,74	0,43
Гл		1	-0,14	-0,27
С6			1	0,70
	ОПФ	Гл	С6	С5
У (содержание РА)	0,24	0,21	0,73	0,43
ОПФ	1	0,11	-0,10	-0,24
Гл		1	-0,14	-0,27
С6			1	0,70

локализации молекул некрахмального полисахарида в структуре алейронового слоя, расположенного рядом с околоплодным [1].

Таблица 6. Корреляционные характеристики зависимостей выделяющихся органических соединений

Наименование	Гл	ОПФ	РА
Частные коэффициенты корреляции	РА-С6/Гл (0,80) С6-С5/Гл (0,70)	РА-С6/ОПФ (0,77) С6-С5/ОПФ (0,70)	С6-С5/РА (0,66) С6-ОПФ/РА (0,77) С6-Гл/РА (0,78)
Коэффициент эластичности ($E > 1 $)	$E(РА) = (1,43)$	$E(РА) = (1,51)$	$E < 1 $
Коэффициент корреляции общий	0,83	0,72	0,84
Коэффициент детерминации общий	0,69	0,52	0,71
Доля неучтенных факторов, %	31	48	29

Выщелачивание общих полифенольных соединений связано с экстракцией растворимого азота и шестичленных углеводов ($R=0,77$), а также суммой редуцирующих соединений ($R=0,70$), что подтверждают данные из других литературных источников [1, 2]. Такая картина, вероятно, обусловлена тем, что полифенольные соединения присутствуют в алейроновом слое, где они связаны с белковыми соединениями, а также в оболочках зерна в ассоциации с лигнинным комплексом [1, 7]. Условия, возникающие при избыточном давлении или ультразвуке, легко воздействуют на структуру алейронового слоя, высвобождая фенольные соединения. Поэтому происходит гидролиз внутренних связей между полиозами, что приводит к высвобождению связанных с ними фенольных соединений. Последние лабильны и при продолжительной обработке разрушаются по мере повышения температуры в более глубоких и сложных, с точки зрения связей, слоях целлюлозно-лигнинного комплекса.

Коэффициент эластичности, свидетельствует о том, что наиболее значимое влияние на высвобождение органических соединений (β-глюкана, общих полифенолов и растворимого азота), в большинстве случаев оказывает растворимый азот. Согласно полученным данным (см. табл. 6), рассмотренные зависимости между факторами выделения некрахмального полисахарида и растворимого азота, связанные с углеводными соединениями, отличаются высоким общим коэффициентом корреляции (около 0,70), а коэффициент детерминации, свидетельствующий о влиянии неучтенных соединений, в среднем составляет 30 %, что обусловлено сложной структурой растительной матрицы дробины. Наименьшим коэффициентом детерминации характеризуется зависимость

выделения общих полифенолов от прочих органических соединений, наличие 48 % неучтенных факторов (со стороны органических соединений) свидетельствует о наиболее сложной локализации и выделении соединений этого класса.

На экстрагирование растворимого азота влияют все факторы (давление, температура, продолжительность обработки). Таким образом, для проведения дальнейшей работы необходимо рассмотреть влияние давления, продолжительности и температуры на изменение количественного содержания растворимого азота по фракциям, в том числе связь фракций с прочими органическими соединениями (см. табл. 4).

Выводы. Отмечена лабильность выделяемых органических соединений в зависимости от давления и ультразвука. Диапазон извлечения фенольных соединений варьирует от 4,1 мг/г дробины при обработке в условиях атмосферного давления и температуры 50 °С в течение 3 ч до 1,2 мг/г при использовании ультра-

звука с частотой 60 кГц в течение 1 ч. Растворимый азот чувствителен к условиям извлечения при избыточном давлении (0,5...1,0 атм), поскольку увеличение выдержки с 0,5 до 1 ч снижает его выход почти на 20 % до (192,8...195,0 мг/г дробины). При атмосферном давлении и температуре 50 °С величина этого показателя снижается до 151,9...184,9 мг/г дробины азота, а наименьших значений она достигает при обработке ультразвуком с частотой 60 кГц (162,3...175,3 мг/г дробины). Для извлечения католитом β-глюкана критично время воздействия избыточного давления (0,5...1,0 атм). При 0,5 ч концентрация некрахмального полисахарида в экстракте составляет 4,9...6,2 мг/г дробины против 7,5...9,0 мг/г дробины в варианте с продолжительностью обработки 1,0 ч. Кроме того, высокое количество β-глюкана извлекается под влиянием ультразвука частотой 40 кГц в течение 0,5 ч (9,0 мг/г дробины). В отношении экстракции шестичленных и пятичленных сахаров отмечается негативное влияние обработки ультразвуком с частотой 40 и 60 кГц. По результатам многофакторного корреляционного анализа установлено, что в подавляющем большинстве случаев, наибольшее влияние на концентрацию оцениваемых органических соединений в экстрактах оказывают продолжительность и температура воздействия. Установлена положительная корреляция между извлечением при обработке дробины католитом растворимого азота и экстракцией других рассматриваемых органических соединений. В целом наиболее предпочтительные условия для обработки дробины католитом складываются при избыточном давлении 1,0 атм в течение 30 мин.

Литература.

1. Kebede Y. Analysis of the physico-chemical characteristics of brewers spent grain (BSG) // *Journal of Natural Sciences Research*. 2020. Vol. 11. No. 18. P. 9–12.
2. Lynch K. M., Steffen E. J., Arendt E. K. Brewers' spent grain: A review with an emphasis on food and health // *J. Inst. Brew.* 2016. Vol. 122. P. 553–568. doi: 10.1002/jib.363.
3. Roth M., Jekle M., Becker T. Opportunities for upcycling cereal byproducts with special focus on Distiller's grains // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 91. P. 282–293. doi: 10.1016/j.tifs.2019.07.041.

4. Recovery of biomolecules of high benefit from food waste / F. Nazzaro, F. Fratianni, M. Ombra, et al. // *Current Opinion in Food Science*. 2018. Vol. 22. P. 43–54. doi: 10.1016/j.cofs.2018.01.012.
5. Using brewer's spent grain to formulate culture media for the production of bacteriocins using Patagonian strains / A. Paz, S. da Silva Sabo, M. Vallejo, et al. // *Lwt*. 2018. Vol. 96. P. 166–174. doi: 10.1016/j.lwt.2018.05.027.
6. Hydrolysis of brewers' spent grain by carbohydrate degrading enzymes / P. Forsell, H. Kontkanen, H. Schols, et al. // *J. Inst. Brew.* 2008. Vol. 114. No. 4. P. 306–314. doi: 10.1002/j.2050-0416.2008.tb00774.x.
7. Composition and nutrient value proposition of brewers spent grain / S. Ikram, L. Huang, H. Zhang, et al. // *Journal of food science*. 2017. Vol. 82. No. 10. P. 2232–2242. doi: 10.1111/1750-3841.13794.
8. Sustainable valorisation pathways mitigating environmental pollution from brewers' spent grains / M. Kavalopoulos, V. Stoumpou, A. Christofi, et al. // *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 270. Article 116069. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120367580> (дата обращения: 15.03.2023). doi: 10.1016/j.envpol.2020.116069.
9. Evaluation of ultrasound pretreatment for enhanced anaerobic digestion of *Sida hermaphrodita* / M. Kisielowska, P. Rusanowska, M. Dudek, et al. // *Bioenergy Research*. 2020. Vol. 13. No. 3. P. 824–832. doi: 10.1007/s12155-020-10108-9.
10. Valorization of brewers' spent grains: Pretreatments and fermentation, a review / S. Mitri, S.-J. Salameh, A. Khelfa, et al. // *Fermentation*. 2022. Vol. 8. No. 2. Article 50. URL: <https://www.mdpi.com/2311-5637/8/2/50> (дата обращения: 15.03.2023). doi: 10.3390/fermentation8020050.
11. Смятская Ю. А., Попов В. С. Использование растительных отходов для изготовления биосорбентов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2020. № 2. С. 88–101. doi: 10.15593/2224-9400/2020.2.07.
12. Кобелев К. В., Гернет М. В., Грибкова И. Н. Разработка инновационного способа получения биологически активных соединений пивной дробины // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51. № 1. С. 113–124. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-113-124.
13. Danylkovych A. G., Lishchuk V. I., Romaniuk O. O. Use of electrochemically activated aqueous solutions in the manufacture of fur materials // *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5. Article 214. URL: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-1784-6> (дата обращения: 15.03.2023). doi: 10.1186/s40064-016-1784-6.
14. Electrochemical degradation of lignin by ROS / H. Jiang, A. Xue, Z. Wang, et al. // *Sustainable Chemistry*. 2020. Vol. 1. No. 3. P. 345–360. doi: 10.3390/suschem1030023.
15. Verni M., Verardo V., Rizzello C. How fermentation affects the antioxidant properties of cereals and legumes // *Foods*. 2019. Vol. 8. No. 9. Article 362. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/8/9/362> (дата обращения: 15.03.2023). doi: 10.3390/foods8090362.
16. Protease-induced solubilisation of carbohydrates from brewers' spent grain / C. B. Faulds, S. Collins, J. A. Robertson, et al. // *Journal of Cereal Science*. 2009. Vol. 50. No. 3. P. 332–336. doi: 10.1016/j.jcs.2009.01.004.
17. Celus I., Brijis K., Delcours J. A. Enzymatic hydrolysis of brewers' spent grain proteins and technofunctional properties of the resulting hydrolysates // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007. Vol. 55. No. 2. P. 8703–8710. doi: 10.1021/jf071793c.
18. Microwave superheated water and dilute alkali extraction of brewers' spent grain arabinoxylans and arabinoxyloligosaccharides / E. Coelho, M. A. M. Rocha, J. A. Saraiva, et al. // *Carbohydrate Polymers*. 2014. Vol. 99. P. 415–422. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.09.003.
19. The properties and formation mechanism of oat beta-glucan mixed gels with different molecular weight composition induced by high-pressure processing / R. Fan, P. Ma, D. Zhou, et al. // *PLOS ONE*. 2019. Vol. 14. Article e0225208. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0225208> (дата обращения: 15.03.2023). doi: 10.1371/journal.pone.0225208.
20. Understanding the stabilizing effect of histidine on mAb aggregation: A molecular dynamics study / S. Saurabh, C. Kalonia, Z. Li, et al. // *Mol. Pharmaceutics*. 2022. Vol. 19. No. 9. P. 3288–3303. doi: 10.1021/acs.molpharmaceut.2c00453.

References

1. Kebede Y. Analysis of the physico-chemical characteristics of brewers spent grain (BSG). *Journal of Natural Sciences Research*. 2020;11(18):9-12.
2. Lynch KM, Steffen EJ, Arendt EK. Brewers' spent grain: A review with an emphasis on food and health. *J. Inst. Brew.* 2016;122:553-68. doi: 10.1002/jib.363.
3. Roth M, Jekle M, Becker T. Opportunities for upcycling cereal byproducts with special focus on Distiller's grains. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;91:282-93. doi: 10.1016/j.tifs.2019.07.041.
4. Nazzaro F, Fratianni F, Ombra M, et al. Recovery of biomolecules of high benefit from food waste. *Current Opinion in Food Science*. 2018;22:43-54. doi: 10.1016/j.cofs.2018.01.012.
5. Paz A, da Silva Sabo S, Vallejo M, et al. Using brewer's spent grain to formulate culture media for the production of bacteriocins using Patagonian strains. *Lwt*. 2018;96:166-74. doi: 10.1016/j.lwt.2018.05.027.
6. Forsell P, Kontkanen H, Schols H, et al. Hydrolysis of brewers' spent grain by carbohydrate degrading enzymes. *J. Inst. Brew.* 2008;114(4):306-314. doi: 10.1002/j.2050-0416.2008.tb00774.x
7. Ikram S, Huang L, Zhang H, et al. Composition and nutrient value proposition of brewers spent grain. *Journal of food science*. 2017;82(10):2232-42. doi: 10.1111/1750-3841.13794.
8. Kavalopoulos M, Stoumpou V, Christofi A, et al. Sustainable valorisation pathways mitigating environmental pollution from brewers' spent grains. *Environmental Pollution [Internet]*. 2021 [cited 2023 Mar 15];270: Article 116069. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120367580>. doi: 10.1016/j.envpol.2020.116069.
9. Kisielowska M, Rusanowska P, Dudek M, et al. Evaluation of ultrasound pretreatment for enhanced anaerobic digestion of *Sida hermaphrodita*. *Bioenergy Research*. 2020;13(3):824-32. doi: 10.1007/s12155-020-10108-9.
10. Mitri S, Salameh S-J, Khelfa A, et al. Valorization of brewers' spent grains: Pretreatments and fermentation, a review. *Fermentation [Internet]*. 2022 [cited 2023 Mar 15];8(2): Article 50. Available from: <https://www.mdpi.com/2311-5637/8/2/50>. doi: 10.3390/fermentation8020050.
11. Smyatskaya YuA, Popov VS. [Use of plant waste for the manufacture of biosorbents]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2020;(2):88-101. Russian. doi: 10.15593/2224-9400/2020.2.07.
12. Kobleev KV, Gernet MV, Gribova IN. [Development of an innovative method for obtaining biologically active compounds of brewer's grains]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2021;51(1):113-24. Russian. doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-113-124.
13. Danylkovych AG, Lishchuk VI, Romaniuk OO. Use of electrochemically activated aqueous solutions in the manufacture of fur materials. *SpringerPlus [Internet]*. 2016 [cited 2023 Mar 15];5: Article 214. Available from: <https://springerplus.springeropen.com/articles/10.1186/s40064-016-1784-6>. doi: 10.1186/s40064-016-1784-6.
14. Jiang H, Xue A, Wang Z, et al. Electrochemical degradation of lignin by ROS. *Sustainable Chemistry*. 2020;1(3):345-60. doi: 10.3390/suschem1030023.

15. Verni M, Verardo V, Rizzello C. How fermentation affects the antioxidant properties of cereals and legumes. *Foods* [Internet]. 2019 [cited 2023 Mar 15];8(9): Article 362. Available from: <https://www.mdpi.com/2304-8158/8/9/362>. doi: 10.3390/foods8090362.
16. Faulds CB, Collins S, Robertson JA, et al. Protease-induced solubilisation of carbohydrates from brewers' spent grain. *Journal of Cereal Science*. 2009;50(3):332-6. doi: 10.1016/j.jcs.2009.01.004.
17. Celus I, Brijis K, Delcour JA. Enzymatic hydrolysis of brewers' spent grain proteins and technofunctional properties of the resulting hydrolysates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007;55(2):8703-10. doi: 10.1021/jf071793c.
18. Coelho E, Rocha MAM, Saraiva JA, et al. Microwave superheated water and dilute alkali extraction of brewers' spent grain arabinoxylans and arabinoxyloligosaccharides. *Carbohydrate Polymers*. 2014;99:415-22. doi: 10.1016/j.carbpol.2013.09.003.
19. Fan R, Ma P, Zhou D, et al. The properties and formation mechanism of oat beta-glucan mixed gels with different molecular weight composition induced by high-pressure processing. *PLOS ONE* [Internet]. 2019 [cited 2023 Mar 15];14: Article e0225208. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0225208>. doi: 10.1371/journal.pone.0225208.
20. Saurabh S, Kalonia C, Li Z, et al. Understanding the stabilizing effect of histidine on mAb aggregation: A molecular dynamics study. *Mol. Pharmaceutics*. 2022;19(9):3288-303. doi: 10.1021/acs.molpharmaceut.2c00453.

ВНИМАНИЮ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ И ДРУГИХ ЗАИНТЕРЕСОВАННЫХ ЛИЦ!

Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК» издает монографии
и другую книжную продукцию с редактированием и всеми выходными данными.

Цены договорные.

Заявки отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166.

Тел.: (963) 758-48-44. E-mail: agroark@mail.ru

Требования к оформлению статей в журнале «Достижения науки и техники АПК»

В статье должно быть кратко изложено состояние дел по изучаемой проблеме со ссылками на публикации (желательно не менее трех ссылок). Затем указаны цели, задачи, условия и методы исследований. Подробно представлены результаты экспериментов и их анализ. Сделаны выводы и даны предложения производству. В статье следует по возможности выделять следующие блоки: введение; цель и задачи исследований; условия, материалы и методы исследований; результаты исследований; выводы.

Вместе со статьей должны быть представлены перевод названия на английский язык; аннотация (200-250 слов) на русском и английском языках; ключевые слова на русском и английском языках; полные почтовые адреса всех учреждений, в которых работают авторы, на русском и английском языке; ученые степени и должности авторов на русском и английском языке код УДК; библиографический список.

В тексте ссылка на источник отмечается соответствующей цифрой в квадратных скобках в порядке цитирования. В списке литературы приводятся только те источники, на которые есть ссылка в тексте. Использование цитат без указания источника информации запрещается.

Материал для подачи в журнал набирается в текстовом редакторе Word версия не ниже 97 файл с расширением *.rtf.

Объем публикации 12- 16 стр. машинописного текста набранного шрифтом Times New Roman, размер кегля 14 с полуторным интервалом. На 2,5 страницы текста допускается не более 1 рисунка или таблицы.

Статьи необходимо направлять с сопроводительным письмом с указанием сведений об авторах (фамилия, имя, отчество – полностью, ученая степень, место работы и занимаемая должность) на русском и английском языке, контактных телефонов и адреса электронной почты для обратной связи.

На публикацию представляемых материалов необходимо письменное разрешение и рекомендация руководства организации, на средства которой проводились исследования. Его вместе с одним экземпляром рукописи, подписанным авторами, и статей в электронном виде нужно отправлять по адресу: 101000, г. Москва, Моспочтамт, а/я 166, ООО «Редакция журнала «Достижения науки и техники АПК». Для ускорения выхода в свет материалы в электронном виде можно направлять по адресу: agroark@mail.ru.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Несоответствие статьи по одному из перечисленных пунктов может служить основанием для отказа в публикации.

Все рукописи, содержащие сведения о результатах научных исследований, рецензируются, по итогам рецензирования принимается решение о целесообразности опубликования материалов.