

ХИМИЧЕСКАЯ И БИОДЕГРАДАЦИЯ БЕЛКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

А.Н. Иванкин

Мытищинский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», 141005, Россия, Московская обл., г. Мытищи,
ул. 1-я Институтская, д. 1

aivankin@mgul.ac.ru

Представлен сопоставительный анализ данных состава связанных в белке и свободных аминокислот объектов растительного и иного происхождения. Описан метод кислотного гидролиза жесткого белкового сырья, позволяющий практически полностью, с выходом более 95 %, деградировать белковую структуру при температуре 105 °С и гидромодуле 1:4 в присутствии 6М раствора соляной или серной кислоты в течение 24 ч. Приведен аминокислотный состав получаемых кислотных гидролизатов. Рассмотрена возможность химической деградации белковых структур в присутствии слабых органических кислот, в качестве которых можно использовать молочную и лимонную кислоты. Показано, что получаемый в этом случае продукт может содержать до одной трети свободных аминокислот, а также 25...35 % коротких пептидов. Охарактеризованы недостатки химической деградации белковых структур из-за возможной рацемизации высвобождаемых в ходе гидролиза белка свободных аминокислот в присутствии сильных минеральных кислот и оснований. Проанализированы возможности биохимической дефрагментации растительных белков под воздействием ферментов. Показано, что ферментативная обработка белков может быть осуществлена с эффективностью 65...85 % при низких температурах 30...50 °С в течение 4...6 ч при фермент субстратном соотношении от 1:10 до 1:100 в зависимости от активности типа энзима и его гидралазной активности. Дан краткий обзор особенностей получения белковых гидролизатов и проведено сопоставление кинетики гидролиза белков под воздействием ферментных систем, а также минеральных и органических кислот. Сделан вывод о перспективности осуществления химической и биодegradации белкового сырья растительного происхождения для получения полезных компонентов питательных систем.

Ключевые слова: растительный белок, биодegradация, гидролиз, кислотные гидролизаты, ферментативные гидролизаты

Ссылка для цитирования: Иванкин А.Н. Химическая и биодegradация белковых компонентов растительного происхождения // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 85–94.
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94

Растительный мир является неисчерпаемым источником множества полезных веществ, используемых человеком для пищевых, медицинских, косметических и технических целей.

В древесине, так же, как и в сельскохозяйственных растениях содержатся различные по природе химические компоненты. Состав зеленой массы, прежде всего содержание в ней хлорофилла, витаминов, белков и полисахаридов, зависит от многих факторов, в том числе от видовых особенностей растения, его возраста, климатических условий окружающей среды, состава почвы произрастания, времени суток, количества выпадаемых атмосферных осадков, сезонных колебаний температуры воздуха, освещенности и множества других факторов [1].

Динамика изменения содержания полезных компонентов в растениях существенно различается. Например, в зимний период в растениях происходит накопление питательных веществ, способствующих вегетативному росту весной.

Важнейшим компонентом являются белки. В коре обычно содержится в 2 раза больше белков, чем в ствольной части и в 2 раза меньше клетчатки. С увеличением толщины веток, например у лиственных пород, содержание клетчатки в стволе значительно уменьшается. Считается, что наибольшее количество питательных веществ содержится в листьях и хвое лесных культур, кроме того, здесь содержится значительное количество перевариваемого белка.

Растительные белки лесного происхождения до настоящего времени не нашли достойного применения, поскольку в сельскохозяйственном растениеводстве в значительном количестве производят пищевые продукты на основе таких быстрорастущих культур, как рис, пшеница, кукуруза и соя. Сегодня соевые белки представляют большой интерес из-за огромных масштабов производства. Более того, потребность в сое в свое время была удовлетворена в значительной степени благодаря созданию семян сои и продуктов на их основе методами генетической инженерии, что позволило существенно повысить урожайность и производство

Т а б л и ц а 1

Аминокислотный состав белков различного происхождения, г/100 г белка

Amino acid composition of proteins of various origins, g/100 g of protein

Аминокислота	Листва березы	Хвоя ели	Трава (клевер)	Зеленые водоросли (хлорелла)	Гриб опенок	Соя	Кровь свиная	Казеин в молоке	Дрожжи пивные
Незаменимые, в том числе:	37,1	41,1	51,2	42,3	45,6	36,1	46,5	43,1	34,2
валин (Вал)	4,1	5,2	5,7	4,4	6,3	4,8	7,8	5,8	5,6
изолейцин (Иле)	3,2	3,1	6,4	5,8	4,9	4,9	3,5	4,1	3,6
лейцин (Лей)	6,1	5,6	9,3	6,3	8,3	6,9	12,0	7,2	6,6
лизин (Лиз)	4,6	6,9	7,7	5,7	7,2	5,7	4,1	7,2	5,2
метионин (Мет)	5,9	5,4	3,1	2,8	3,8	1,3	2,2	2,8	0,8
тирозин (Тир)	2,7	2,5	2,8	3,9	2,5	2,9	4,6	5,3	3,2
треонин (Тре)	3,4	3,9	4,2	5,5	4,9	2,2	4,7	4,9	4,3
триптофан (Трп)	2,1	1,8	3,1	1,9	1,4	1,3	1,3	1,2	0,7
фенилаланин (Фен)	3,5	4,4	6,4	5,1	4,1	4,5	4,7	4,0	4,1
цистин (Цис)	1,5	2,3	2,5	0,9	2,2	1,6	1,6	0,5	0,1
тирозин (Тир)	2,7	2,5	2,8	3,9	2,5	2,9	4,6	5,3	3,2
Заменимые, в том числе:	48,6	47,4	34,3	43,7	49,3	55,8	49,9	49,6	54,7
аланин (Ала)	4,8	4,3	3,2	6,1	7,9	3,7	8,9	3,2	6,9
аргинин (Арг)	5,7	4,4	4,8	5,9	7,1	6,5	5,5	4,5	6,4
аспарагин (Асп)	11,8	10,9	6,4	6,8	6,7	10,9	6,0	6,1	9,5
гистидин (Гис)	2,6	3,7	2,8	3,8	3,7	2,3	2,0	2,2	3,6
глицин (Гли)	3,2	3,6	3,8	5,7	4,8	3,8	5,3	2,1	4,5
глутамин (Глу)	10,7	11,2	6,5	9,3	10,6	16,6	10,2	16,8	14,5
пролин (Про)	5,0	5,8	3,7	2,6	3,3	6,1	4,7	8,5	3,9
серин (Сер)	4,8	3,5	3,1	3,5	5,5	5,9	7,3	6,3	5,4
СУММА	85,7	88,4	85,5	86,0	94,9	91,9	96,4	92,7	88,9
Содержание белка в объекте, %	2,1	1,9	0,8	1,1	4,2	34,5	8,0	3,3	6,5

сои в целом. На сегодняшний день растительный белок из генно-модифицированной сои, а также кукурузы, является преобладающим продуктом на рынке продукции пищевой индустрии.

Растительный мир в силу своего биоразнообразия, относительно простых условий произрастания и масштабности объемов производства представляет собой глобальный интерес для получения ценных пищевых систем.

Цель работы

Цель работы — рассмотрение возможности трансформации белковых систем под воздействием ферментов и химических реагентов, приводящих к последовательному распаду белковых макрокомплексов до пептидов и далее до свободных аминокислот.

Растительные белки

Белки являются основными составляющими компонентами всех живых систем. Они входят в состав клеточных структур и определяют их существование [2, 3].

Количество белков различной молекулярной массы и строения в нативных растительных объектах зависит от вида растения, возраста, сезона и многих других факторов и обычно не превышает уровень 5...12 % на фоне аналогичного уровня содержания липидов — до 10 % и углеводов, количество которых колеблется в растительных объектах и может превышать 50...60 %. Содержание белка в процентах от массы свежей ткани может составлять: в семенах 10...13, стеблях 1,5...3,0, листьях 1...3, корнях 0,5...3,0, фруктах 0,2...1,5.

Количество белка обычно определяют методом сжигания, по Кьельдалю, с последующим умножением найденного содержания элементарного азота на эмпирический коэффициент — 6,1...6,25. Необходимость количественного определения белка в растительных объектах методом сжигания обусловлена нерастворимостью белковых компонентов. Растворимые белки могут определяться спектрофотометрически.

Растительные объекты как выделенные из сырья продукты обычно включают в своем составе до 30...75 % влаги. В переработанной растительной

продукции количество белка может быть значительным, например в соевых продуктах содержание белка может превышать уровень 35...55 % [4, 5].

В листе древесных пород с влажностью 62...72 % может содержаться от 2 до 5 % растительного белка, в т. ч. 2,5 % жиров и липидов, 4...7 % клетчатки, 13...21 % экстрактивных веществ, 1,5...3,2 % неорганических солей (зола). В хвое при влажности 50...58 % содержание белка составляет 2...6 %, жиров 4...5 %, клетчатки 8...15 %, экстрактивных веществ 20...23 %, зола 1,3...3,1 % [2, 4, 7].

Белки — это природные биополимеры, молекулярная структура которых представлена последовательностью аминокислот, разнородность которых определяет их биологическое разнообразие [6–8].

В табл. 1 представлен аминокислотный состав некоторых важнейших белков с разбивкой на группы заменимых и незаменимых аминокислот, что важно для пищевых систем живых организмов. Из приведенных данных видно, что содержание индивидуальных аминокислот варьирует в составе растительных белков на уровне некоторых базовых значений. Их обычно определяют методом высокоэффективной жидкостной хроматографии белковых гидролизатов с использованием автоматических аминокислотных анализаторов [2, 6].

По данным, представленным в табл. 1, видно, что аминокислотный состав природных белков растительного, животного, рыбного или микробиологического происхождения включает в себя 20 известных базовых *L*-аминокислот и отличается только их соотношениями, что определяют филогенетическое происхождение белков. Следует отметить, что в приводимых в литературе данных о практическом аминокислотном анализе обычно приводится содержание 18 аминокислот, при этом глутамин и глутаминовая кислота фиксируются одним показателем — Глу, аналогично аспарагин и аспарагиновая кислота — как Асп [9].

Необходимо также отметить, что представленные данные (см. табл. 1) соответствуют усредненным значениям для фактически смесевых белков, каковыми они являются в матрице природного объекта.

Связанные в природные макрокомплексы белки, в составе всех природных объектов подвержены постоянным гидролитическим процессам, осуществляемым под воздействием внутренних ферментов. Вследствие этого в растительной, животной и любой другой биомассе фиксируется некоторое количество свободных аминокислот, массовая доля которых, в зависимости от объекта и условий хранения, может достигать 0,5...2,0 % масс. от общего содержания белка [4, 10, 11].

Т а б л и ц а 2

Свободные аминокислоты в составе еловой древесины, мкг/г

Free amino acids in the composition of spruce wood, mcg/g

Аминокислота	Ствол	Корни	Листва
Ала	43	125	39
Арг	33	91	26
Асп	25	27	30
Вал	6	23	9
Гис	3	8	2
Гли	34	66	25
Глу	17	28	27
Иле	13	16	6
Лей	10	15	6
Лиз	4	14	4
Мет	1	3	1
Про	24	115	22
Сер	48	62	46
Тир	4	22	2
Тре	7	9	4
Трп	1	3	1
Фен	2	6	3
Цис	10	8	3
СУММА	285	641	256
Свободные аминокислоты, % массы образца	0,03	0,06	0,02

В табл. 2 приведены уровни свободных аминокислот, характерных для растительных объектов.

Из приведенных данных по аминокислотному составу природных белков можно заключить, что биомасса, вне зависимости от происхождения, может выступать в качестве источника полезных белков.

Нехватка белковой пищи представляет собой главную проблему жизнеобеспечения. В связи с этим, развитие научных исследований, сельскохозяйственная деятельность и пищевая индустрия всегда были направлены на включение в пищевые рационы как можно большего количества первичного и вторичного белка [12, 13].

Основная проблема потребления белка заключается в обеспечении его доступности. Недостаточно иметь просто белковое сырье. Необходимо, чтобы используемый белок был доступным для пищеварительных систем живых организмов. Например, под доступными для пищеварения млекопитающих и самого человека, понимают белки с молекулярной массой менее 10...25 кДа. Причем оптимальным должен

быть аминокислотный состав, максимально приближенный к стандарту. В качестве такого стандартного белка, благоприятного для человека, можно рассматривать казеин и другие белки женского молока, у которых соотношения заменимых и незаменимых индивидуальных аминокислот соответствуют данному, естественно благоприятному для человека продукту [14, 15].

Доступность белков для получения пищевых систем может быть повышена путем гидролиза сырья, содержащего связанные белки. В литературе имеется много публикаций, описывающих получение белковых гидролизатов из растительного и других видов сырья. Переработку белкового сырья обычно осуществляют в присутствии ферментов, органических или минеральных кислот [15–19].

Повышение биологической доступности белков предопределяет возможность их экстракции из белкового сырья и обеспечивает деградацию до малых белков — пептидов и олигопептидов, а также, в ряде случаев — тотальный гидролиз белка до аминокислот. Простая экстракция сырья, например, водно-солевыми растворами, не позволяет извлекать более 1...5 % так называемых растворимых белков из общего пула высокомолекулярных белковых компонентов. Как правило, растворимые белки имеют небольшую молекулярную массу, однако низкий технологический выход операции селективной экстракции не является приемлемым.

Кислотные гидролизаты

Кислотные гидролизаты получают, как правило, под воздействием сильных минеральных кислот. Стандартный режим обработки, позволяющий нацело деградировать белковую структуру, обычно осуществляют в следующих условиях: температура 105 °С, время 24 ч, гидромодуль 1:4 в присутствии 6М раствора соляной или серной кислоты [15]. Такой режим обработки обеспечивает расщепление до свободных аминокислот практически любых белков с жесткой каркасной структурой, включая кератины, коллагены, флавопротеины и другие родственные белки клеточных структур. Данные условия обычно используют в аналитической биохимии при определении аминокислотного состава.

Продукты кислотной обработки белков в виде гидролизатов, состоящих на 80...90 % из свободных аминокислот, используют в медицине при парентеральном питании, когда необходимо внутривенно вводить питательную смесь для поддержания жизнедеятельности ослабленного организма [20, 21].

Кислотные гидролизаты нашли ограниченное применение из-за возможности химического разрушения в жестких условиях отдельных аминокислот, в первую очередь серина, триптофана, цистина и метионина. Цистин и метионин в частности при обработке минеральными кислотами могут разрушаться на 60...80 % [9, 14, 20].

Кислотный гидролизат, полученный из растительного кукурузного белка может содержать, г/100 г продукта: Вал 0,4; Иле 0,25; Лей 0,85; Лиз 0,3; Мет 0,15; Тир 0,3; Тре 0,26; Трп 0,05; Фен 0,34; Цис 0,12; сумма незаменимых 3,02 или 42 г/100 г исходного белка; Ала 0,52; Арг 0,35; Асп 0,48; Гис 0,21; Гли 0,1; Глу 0,5; Про 1,4; Сер 0,6; сумма заменимых 4,16 или 57,7 г/100 г белка. Содержание белка в исходном сырье — 7,2 % [22].

В первоначальных работах, посвященных химической деградации растительных и животных белков были попытки использовать щелочной гидролиз. Исследования показали, что в присутствии растворов щелочей может происходить процесс рацемизации. Все составляющие природные белки аминокислоты, являются *L*-формами. Возникновение их рацематов в виде аналогичных *D*-форм приводит к биохимическим и, по-видимому, генетическим нарушениям обмена веществ в живых организмах, поэтому гидролизаты с примесями *D*-аминокислот практически не используются [23].

В последнее время, в работах [9, 24–26], посвященных гидролитической переработке белкового сырья, стали использовать для получения кислотных гидролизатов слабые органические кислоты, как правило, пищевого назначения. В качестве таких кислот можно использовать винную, лимонную или молочную кислоты.

Условиями получения гидролизатов в этом случае обычно указывают следующие: концентрация кислоты 20 %, время обработки 4...8 ч, температура 50...80 °С, гидромодуль, определяемый как массовое соотношение белка и жидкости, составляет от 1:2 до 1:6. Отмеченные условия позволяют получать гидролизаты не только растительного происхождения, но также микробного, животного происхождения и из гидробионтов с выходом 50...85 %. Получаемые под действием органических кислот продукты могут содержать до 10...35 % пептидных фракций и до 15...25 % нерасщепленных белков [23, 25].

Так, слабокислотный гидролизат мышечного свиного белка может содержать, г/100 г белка: Вал 5,5; Иле 4,7; Лей 8,4; Лиз 10,3; Мет 3,8; Тир 3,8; Тре 5,8; Трп 1,3; Фен 4,6; Цис 1,5; сумма незаменимых 48,6; Ала 3,4; Арг 7,3; Асп 7,7; Гис 3,4; Гли 3,1; Глу 15,5; Про 3,1; Сер 2,1; сумма заменимых 46,3. Аналогичный гидролизат

из морских гидробионтов может иметь аминокислотный состав, г/100 г белка: Вал 4,0; Иле 1,7; Лей 6,6; Лиз 8,1; Мет 1,9; Тир 1,1; Тре 2,6; Фен 1,1; Цис 1,1; сумма незаменимых 28,9; Ала 6,4; Арг 2,2; Асп 11,5; Гис 1,4; Гли 11,6; Глу 20,5; Про 4,6; Сер 7,1; сумма заменимых 62,1.

Ферментативные гидролизаты

В последние десятилетия основным способом переработки растительного белкового сырья стал метод ферментативного гидролиза. Данный способ осуществляют в присутствии растительных (папаин, фицин), микробных (различные протеазы), чаще животных (ренин, панкреатин, коллагеназы) ферментов. Особенностью метода является относительно невысокая 60...70 % степень гидролиза и практически полное отсутствие в продукте гидролитического расщепления природных белков *D*-форм свободных аминокислот. Продукт ферментативного расщепления может содержать одну треть свободных аминокислот, одну треть — пептидов небольшой молекулярной массы и до одной трети — непереработанных белков.

Т а б л и ц а 3

Белковые фракции в панкреатических гидролизатах из сырья растительного происхождения, % массы белка

Protein fractions in pancreatic hydrolysates from raw materials of plant origin, % protein mass

Молекулярная масса, кДа	Ферментативный гидролизат		
	Соя	Кукуруза	Хвойный белок
>250	1	Не обнаружено	4
70...250	Не обнаружено	5	6
50...70	9	7	12
30...50	8	15	8
20...30	7	12	7
15...20	14	10	15
10...15	18	21	27
<10	43	30	21

В табл. 3 представлены данные по молекулярно-массовому распределению (ММР) белковых фракций некоторых ферментативных гидролизатов, полученных в присутствии панкреатина. Данные ММР получены методом SDS-денатурирующего электрофореза в 18 %-м полиакриламидном геле.

Ферментативные гидролизаты, получаемые из природного сырья различного происхождения, представляют собой продукты относительно мягкого распада белковой структуры. Ферментативный гидролизат, в зависимости от условий обработки, вида исходного сырья и активности применяемого фермента, обычно представляет

собой смесь, одна треть которой (и более) может состоять из свободных аминокислот. Остальная часть продукта может включать пептиды различной молекулярной массы (см. табл. 3) и остатки нефрагментированного белка, массовая доля которого в продукте обычно не превышает нескольких процентов. Использование высокоактивных ферментов позволяет получать количество свободных аминокислот в продукте на уровне 50...85 %.

В последние годы для диетического лечебно-профилактического питания в различных пищевых рецептурах используют белки растительного происхождения, среди которых лидером является соевый белок, используемый в виде высокоочищенных изолятов с содержанием основного белка более 80 %. Медицинские исследования *in vivo* указывают на наличие гипополипидемических и гипохолестеринемических свойств ферментативных гидролизатов соевых белков, поэтому получению ферментативных гидролизатов в последнее время уделяется достаточно большое внимание. Значимой причиной этого также следует считать возможность получения ферментативных гидролизатов из растительного сырья в сравнительно мягких условиях, что легко может быть реализовано в промышленности.

Типичным к проведению процесса ферментативной переработки растительного сырья можно отметить следующий подход [27]. Исходное сырье растительного происхождения — изолят соевого белка «Supro XT 220D IP» (США) в виде 5%-го раствора. Его обрабатывают в целях получения ферментативного гидролизата ферментным препаратом панкреатином из поджелудочной железы свиньи при температуре 50 °С с массовым соотношением белка к ферменту 50:1 и 20:1 по сухим веществам. Время гидролиза 5 ч. Содержание в продукте низкомолекулярной фракции короткоцепочечных пептидов с молекулярной массой менее 1,6 кДа и свободных аминокислот при ферментализации в течение 3 ч и соотношении белка к ферменту 20:1 составило 25 и 26 % соответственно. При увеличении времени ферментализации до 5 ч соответствующие значения оказывались равными 30 и 33 %. Лиофильно высушенные гидролизаты полностью растворялись в воде их можно было использовать в качестве белкового модуля при создании специализированных пищевых продуктов для больных с алиментарно-зависимыми заболеваниями [27].

Ферментативный гидролизат, полученный из растительного белка сои, может содержать, г/100 г продукта: Вал 1,3; Иле 1,25; Лей 2,85; Лиз 3,1; Мет 0,6; Тир 1,9; Тре 2,2; Трп 0,65; Фен 2,42; Цис 0,62; сумма незаменимых 16,9 или 43 г/100 г исходного белка; Ала 1,19; Арг 2,61; Асп 2,85;

Таблица 4

Кинетические характеристики гидролиза модельного соевого белка ферментным комплексом поджелудочной железы

Kinetic characteristics of hydrolysis of model soy protein by pancreatic enzyme complex

Кинетические характеристики	Температура, °С («быстрая» стадия)			
	30	35	40	50
$V_{\max} \cdot 10^2$, мгNH ₂ /мл·мин ⁻¹	1,56	1,88	2,74	3,02
$K_m \cdot 10^2$, мгNH ₂ /мл	1,29	1,41	1,52	1,61
Свободные аминокислоты, % к массе белка	2,7	4,6	6,1	8,2

Гис 1,21; Гли 2,1; Глу 7,1; Про 2,7; Сер 1,6; сумма заменимых 21,36 или 55 г/100 г белка. Содержание белка в исходном сырье 38,5 %.

Эффективность подхода к химическому и ферментативному способу деградации белковых компонентов растительного происхождения можно оценить на основании анализа основных кинетических характеристик химического и биохимического распада белка.

В табл. 4 представлены типичные макрокинетические характеристики, установленные по начальным участкам развития процесса получения панкреатического гидролизата из соевого белка. В таблице указаны: максимальная скорость распада белка V_{\max} , оцениваемая по накоплению свободных аминных NH₂-групп высвободившихся аминокислот [15, 20], константа Михаэлиса K_m , характеризующая в данном случае, эффективность фермента, а также достигнутые первоначальные уровни высвобождения аминокислот из структуры белка.

Панкреатический ферментный комплекс, получаемый из поджелудочной железы животного происхождения, является достаточно активной полиферментной системой, обладающей гидролазной, протеазной, липазной, амилазной и другими видами специфической биохимической активности. Такую достаточно универсальную ферментную систему, способную расщеплять широкий спектр субстратов, можно эффективно использовать для получения ферментализатов растительных белков. Данная ферментная система фактически моделирует *in vitro* процесс, который происходит с пищей *in vivo* в пищеварительной системе млекопитающих [28–32].

Из табл. 4 следует, что данный ферментный комплекс является достаточно активным по отношению к белковому субстрату.

В табл. 5 и 6 приведены значения кинетических констант и энергий активаций высвобождения индивидуальных кислот из соевого белка,

Таблица 5

Макрокинетические константы, энергия активации и выход аминокислот в процессе ферментативного гидролиза растительного (соевого) белка при температуре 45 °С на первоначальной, самой быстрой стадии процесса

Macrokinetic constants, activation energy and amino acid yield in the process of enzymatic hydrolysis of vegetable (soy) protein at 45 °С at the initial, fastest stage of the process

Аминокислота	$V_{\max} \cdot 10^4$, г/100 г белка, с ⁻¹	K_m , г/100 г белка	E_a , кДж/моль	Выход, %
Незаменимые аминокислоты				
Вал	2,44	1,35	26,7	23,2
Иле	1,22	0,89	19,5	22,4
Лей	4,5	3,35	29,7	34,6
Лиз	4,13	3,11	32,8	32,2
Мет	1,14	0,44	22,2	19,9
Тир+Фен	3,22	2,38	43,7	77,1
Тре	0,92	0,61	18,1	26,0
Фен	2,85	2,65	29,6	35,5
Заменимые аминокислоты				
Ала	1,75	0,66	32,8	6,9
Арг	5,22	3,52	21,3	61,5
Асп	0,67	0,21	20,4	40,4
Гис	2,94	2,39	48,5	45,3
Гли	0,45	0,21	18,6	22,4
Глу	1,52	0,84	17,2	16,8
Сер	1,26	0,63	30,0	14,5

Таблица 6

Кинетические характеристики гидролиза растительного белка сои 20%-й молочной кислотой

Kinetic characteristics of soybean vegetable protein hydrolysis 20 % lactic acid

Температура процесса, °С	Эффективная константа скорости $k_{эфф} \cdot 10^3$, мин ⁻¹
100	6,3
105	8,3
110	10,2

найденные в ходе кинетических определений в стандартных условиях [28].

В табл. 5 представлены данные выхода индивидуальных аминокислот из белковой структуры при ее ферментативной деградации. Практический выход свободных аминокислот на первоначальной стадии процесса, оцениваемой в течение первых нескольких минут, составляет от 6 до 77 %, что в определенной степени коррелирует с фактическим содержанием этих аминокислотных звеньев в исходном белке (см. табл. 1) и зависит от активности энзиматической системы.

Т а б л и ц а 7

Эффективные значения энергии активации процесса гидролиза 20%-й молочной кислотой растительного белка после ферментативного гидролиза по отдельным аминокислотам

Effective values of the activation energy of the process of hydrolysis with 20 % lactic acid of vegetable protein after enzymatic hydrolysis for individual amino acids

Аминокислота	Эффективная энергия активации E_a , кДж/моль
Аланин	88,9
Аргинин	42,1
Аспарагиновая кислота	41,2
Валин	71,4
Гистидин	59,7
Глицин	20,2
Глутаминовая кислота	43,9
Изолейцин	63,2
Лейцин	61,2
Лизин	54,7
Метионин	62,1
Пролин	77,1
Тирозин	53,5
Треонин	66,1
Фенилаланин	69,4

По данным, представленным в табл. 5 и 7, можно заключить, что ферментативный гидролиз растительного белка энергетически более выгоден, чем химический. Поскольку под воздействием кислот, особенно минеральных, происходит практически тотальный распад белковой структуры, энергии, вводимой в систему, получается больше, поэтому возможен дополнительный, однако нежелательный с точки зрения качества продукта, процесс рацемизации.

Исследования практического применения химических и ферментативных гидролизатов, выполненные различными исследователями, показывают, что использование белковых гидролизатов достаточно эффективно в составе животных кормов и микробиологических сред, в пищевых системах, а также в качестве продуктов для медицины [25, 27, 28, 30]. Сырьем для таких полезных продуктов может выступать не только растительный белок, но и белки иного происхождения.

Выводы

Краткое рассмотрение условий и результатов процессов химической и биохимической деградации растительных белков, в сопоставлении с белками иного филогенетического происхождения, показывает, что реализация природного механизма деградации белковых структур, позволяет не только осуществлять процесс переработки природного сырья с точки зрения его экологической

деградации в безопасные продукты, но и получать полезные вещества, которые можно использовать в качестве компонентов питательных систем.

Список литературы

- [1] Кононов Г.Н. Дендрохимия — химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток, тканей и органов древесных растений. М.: МГУЛ, 2016. 1111 с.
- [2] Xu L., Wang Z., Sun F., Cao Y., Zhong C., Zhang W.B. Harnessing proteins for engineered living materials // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2021, v. 25, no. 1, p. 100896. doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100896
- [3] Aphicho K., Narongyot Kittipanukul N., Uttamapinant C. Visualizing the complexity of proteins in living cells with genetic code expansion // *Current Opinion in Chemical Biology*, 2022, v. 66, no. 2, p. 102108. doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.102108
- [4] Судачкова Н.Е., Милютин И.Л., Семенова Г.Л. Белки и свободные аминокислоты в древесине сосны обыкновенной, лиственницы сибирской и лиственницы Гмелина в центральной Сибири // *Химия растительного сырья*, 2000. № 1. С. 69–76.
- [5] Химический состав продуктов. URL: http://www.intelmeal.ru/nutrition/food_category.php (дата обращения 15.01.2022).
- [6] Степанов В.М. Молекулярная биология. Структура и функции белков. М.: Изд-во МГУ, 2005. 336 с.
- [7] Junprung W., Supungul P., Tassanakajon A. Structure, gene expression, and putative functions of crustacean heat shock proteins in innate immunity // *Developmental & Comparative Immunology*, 2021, v. 115, no. 1, p. 103875. doi.org/10.1016/j.dci.2020.103875
- [8] Hata H., Nishiyama M., Kitao A. Molecular dynamics simulation of proteins under high pressure: Structure, function and thermodynamics // *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, v. 1864, no. 2, p. 129395. doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.07.004
- [9] Кузнецова Т.Г., Иванкин А.Н., Куликовский А.В. Наносенсорный анализ мясного сырья и растительных объектов. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 232 с.
- [10] Riga P., Benedicto L., Gil-Izquierdo A., JacintaCollado-González J., Ferreres F., Medina S. Diffuse light affects the contents of vitamin C, phenolic compounds and free amino acids in lettuce plants // *Food Chemistry*, 2019, v. 272, no. 1, pp. 227–234. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.051
- [11] Matsubara Y., Ishigaki T., Koshikawa K. Changes in free amino acid concentrations in mycorrhizal strawberry plants // *Scientia Horticulturae*, v. 119, no. 4, pp. 392–396. doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.025
- [12] Teimouri S., Kasapis S., Dokouhaki M. Diffusional characteristics of food protein-based materials as nutraceutical delivery systems // *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 122, no. 4, pp. 201–210. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.025
- [13] Hadidia M., Jafarzadeh S., Forough M., Garavand F., Alizadeh S., Salehabadi A., Khaneghah A.M., MahdiJafari S. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications // *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 120, no. 2, pp. 154–173. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.013
- [14] Иванкин А.Н., Бердудина А.В., Неклюдов А.Д. Об экологической безопасности пищевых продуктов // *Экологические системы и приборы*, 2001. № 8. С. 39–44.
- [15] Neklyudov A.D., Ivankin A.N., Berdudina A.V. Properties and uses of protein hydrolysates (Review) // *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2000, v. 36, no. 5, pp. 452–459. doi.org/10.1007/BF02731888

- [16] Lu X., Ma R., Qiu H., Sun C., Tian Y. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility // *International J. of Biological Macromolecules*, 2021, v. 193 A, no. 12, pp. 311–318. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.140
- [17] Jain B.M., Badve M.P. A novel process for synthesis of soybean protein hydrolysates and study of its effectiveness as a biostimulant and emulsifier // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, v. 174, no. 4, 108880. doi.org/10.1016/j.ccep.2022.108880
- [18] Hea W., Guo F., Jiang Y., Liu X., Chen J. Enzymatic hydrolysates of soy protein promote the physicochemical stability of mulberry anthocyanin extracts in food processing // *Food Chemistry*, 2022, v. 386, no. 8, 132811. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132811
- [19] Petrova I., Tolstorebrov I., Zhivlyantseva I., Eikevik T.M. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias // *Food Bioscience*, 2021, v. 42, no. 8, 101063. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063
- [20] Неклюдов А.Д. Выделение коллагенов из органов и тканей млекопитающих // *Экологические системы и приборы*, 2005. № 11. С. 27–36.
- [21] Неклюдов А.Д. Биологические свойства ароматических, гетероциклических, алифатических аминокислот // *Антибиотики и химиотерапия*, 1990. Т. 35. № 5. С. 51–58.
- [22] Saha B.C., Hayashi K. Debitting of protein hydrolyzates // *Biotechnology Advances*, 2001, v. 19, no. 5, pp. 355–370. doi.org/10.1016/S0734-9750(01)00070-2
- [23] Бабурина М.И., Горбунова Н.А., Иванкин А.Н. Ферментативная дефрагментация костного сырья для получения высококачественного белкового продукта // *Мясная индустрия*, 2021. № 12. С. 14–18. doi:10.37861/2618-8252-2021-12-35-39
- [24] Babini E., Tagliacucchi D., Martini S., Piu L.D., Andrea Gianotti A. Identification of novel antioxidant peptides obtained by enzymatic and microbial hydrolysis of vegetable proteins // *Food Chemistry*, 2017, v. 228, no. 8, pp. 186–196. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.143
- [25] Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д., Прошина О.П. Особенности коллагена в мясном сырье // *Мясная индустрия*, 2009. № 1. С. 59–63.
- [26] Ziero H.D., Ampese L.C., Sganzerla W.G., Torres-Mayanga P.C., Timko M.T. Subcritical water hydrolysis of poultry feathers for amino acids production // *The J. of Supercritical Fluids*, 2022, v. 181, no. 2, 105492. doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105492
- [27] Зорин С.Н., Мазо В.К., Воробьева И.С., Воробьева В.М., Асафов В.А. Технология получения пептидного модуля на основе гидролизата белка сои // *Пищевая промышленность*. 2017. № 10. С. 20–23.
- [28] Штильман М.И., Подкорытова А.В., Иванкин А.Н. и др. Технология полимеров медико-биологического назначения. Полимеры природного происхождения. М.: Бинном, 2015. 328 с.
- [29] Guevara-Zambrano J.M., Verkempinck S.H., Hernandez-Ruiz L., Infantes-Garcia M.R., Hendrick M.E., Loe A.M., Grauwet T. Digestion kinetics of lipids and proteins in plant-based shakes: Impact of processing conditions and resulting structural properties // *Food Chemistry*, 2022, v. 382, no. 7, 132306. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132306
- [30] Liew C.S., Raksasat R., Rawindran H., Kiatkittipong W., Lim J.W. Hydrolysis kinetics for solubilizing waste activated sludge at low temperature thermal treatment derived from multivariate non-linear model // *Chemosphere*, 2022, v. 292, no. 4, 133478. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133478
- [31] Олиференко Г.Л., Иванкина А.Н., Жилин Ю.Н., Прошина О.П., Зарубина А.Н., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И. Кинетика кислотной трансформации природных полисахаридов древесной биомассы в моносахара для получения кормовых добавок и микробиологических сред // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2017. Т. 21. № 6. С. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67
- [32] Yu Q., Baroutian S., Xie J. Hydrothermal co-hydrolysis of corncob/sugarcane bagasse/Broussonetia papyrifera blends: Kinetics, thermodynamics and fermentation // *Bioresource Technology*, 2021, v. 342, no. 12, 125923. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125923

Сведения об авторе

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, профессор кафедры химии и химических технологий лесного комплекса ФГБОУ ВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал)», академик МАН ВШ, aivankin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022.

Одобрено после рецензирования 21.09.2022.

Принята к публикации 21.11.2022.

CHEMICAL AND BIOLOGICAL DEGRADATION OF PHYTOGENIC PROTEIN COMPONENTS

A.N. Ivankin

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishi, Moscow reg., Russia

aivankin@mgul.ac.ru

Proteins in the form of biopolymer compounds are the basic components of all objects of natural origin. Hydrolysis of the protein components of plant materials is the main mechanism of biochemical degradation of biomass in nature. The article presents a comparative analysis of data on the composition of protein-bound and free amino acids of objects of plant and other origin. The purpose of the work was to consider the possibility of transformation of protein systems under the influence of enzymes and chemical reagents, leading to the sequential breakdown of protein macrocomplexes to peptides and further to free amino acids. A method of acid hydrolysis of hard protein raw materials is described, which allows almost completely, with a yield of more than 95 %, to degrade the protein structure at a temperature of 105 °C and a hydromodulus of 1:4 in the presence of a 6M solution of hydrochloric or sulfuric acids for 24 hours. the composition of the resulting acid hydrolysates. The possibility of chemical degradation of protein structures in the presence of weak organic acids such as lactic and citric acids is discussed. It has been shown that the resulting product in this case may contain up to a third of free amino acids, as well as 25...35 % of short peptides. Disadvantages of chemical degradation of protein structures due to the possible racemization of free amino acids released during protein hydrolysis in the presence of strong mineral acids and bases are discussed. The possibilities of biochemical defragmentation of plant proteins under the influence of enzymes are discussed. It has been shown that the enzymatic processing of proteins can be carried out with an efficiency of 65...85 % at low temperatures of 30...50 °C for 4...6 h with an enzyme-substrate ratio of 1:10 to 1:100, depending on the activity of the enzyme type and its hydrolase activity. The article presents a brief overview of the features of obtaining protein hydrolysates and compares the kinetics of protein hydrolysis under the influence of enzyme systems, as well as mineral and organic acids. It is concluded that the chemical and biodegradation of plant protein raw materials is promising for obtaining useful components of nutritional systems.

Keywords: vegetable protein, biodegradation, hydrolysis, acid hydrolysates, enzymatic hydrolysates

Suggested citation: Ivankin A.N. *Khimicheskaya i biodegradatsiya belkovykh komponentov rastitel'nogo proiskhozhdeniya* [Chemical and biological degradation of phytogetic protein components]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 85–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-85-94

References

- [1] Kononov G.N. *Dendrokimiya — khimiya, nanokhimiya i biogeokhimiya komponentov kletok, tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry — chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of the components of cells, tissues and organs of woody plants] In 2 vol. Moscow: MSFU, 2016, 1111 p.
- [2] Xu L., Wang Z., Sun F., Cao Y., Zhong C., Zhang W.B. Harnessing proteins for engineered living materials. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2021, v. 25, no. 1, 100896. doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100896
- [3] Aphicho K., Narongyot Kittipanukul N., Uttamapinant C. Visualizing the complexity of proteins in living cells with genetic code expansion. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2022, v. 66, no. 2, 102108. doi.org/10.1016/j.cbpa.2021.102108
- [4] Sudachkova N.E., Milyutina I.L., Semenova G.L. *Belki i svobodnye aminokisloty v drevesine cocny obyknovennoy, listvennitsy sibirskoy i listvennitsy Gmelina v tsestral'noy Sibiri* [Proteins and free amino acids in the wood of common pine, Siberian larch and Gmelin larch in Central Siberia]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2000, no. 1, pp. 69–76.
- [5] *Khimicheskii sostav produktov* [Chemical composition of products] Available at: http://www.intelmeal.ru/nutrition/food_category.php (accessed 15.01.2022).
- [6] Stepanov V.M. *Molekulyarnaya biologiya. Struktura i funktsii belkov* [Molecular biology. Structure and functions of proteins] Moscow: Moscow State University Publ., 2005, 336 c.
- [7] Junprung W., Supungul P., Tassanakajon A. Structure, gene expression, and putative functions of crustacean heat shock proteins in innate immunity. *Developmental & Comparative Immunology*, 2021, v. 115, no. 1, 103875. doi.org/10.1016/j.dci.2020.103875
- [8] Hata H., Nishiyama M., Kitao A. Molecular dynamics simulation of proteins under high pressure: Structure, function and thermodynamics. *Biochimica et Biophysica Acta. General Subjects*, v. 1864, no. 2, 129395. doi.org/10.1016/j.bbagen.2019.07.004
- [9] Kuznetsova T.G., Ivankin A.N., Kulikovskiy A.V. *Nanosensorny analiz myasnogo syr'ya i rastitel'nykh ob'ektov* [Nanosensor analysis of meat raw materials and plant objects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT, 2012, 232 p.
- [10] Riga P., Benedicto L., Gil-Izquierdo A., JacintaCollado-González J., Ferreres F., Medina S. Diffuse light affects the contents of vitamin C, phenolic compounds and free amino acids in lettuce plants. *Food Chemistry*, 2019, v. 272, no. 1, pp. 227–234. doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.051
- [11] Matsubara Y., Ishigaki T., Koshikawa K. Changes in free amino acid concentrations in mycorrhizal strawberry plants. *Scientia Horticulturae*, v. 119, no. 4, pp. 392–396. doi.org/10.1016/j.scienta.2008.08.025
- [12] Teimouri S., Kasapis S., Dokouhaki M. Diffusional characteristics of food protein-based materials as nutraceutical delivery systems. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 122, no. 4, pp. 201–210. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.025

- [13] Hadidia M., Jafarzadeh S., Forough M., Garavand F., Alizadeh S., Salehabadi A., Khaneghah A.M., MahdiJafari S. Plant protein-based food packaging films; recent advances in fabrication, characterization, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, v. 120, no.2, pp. 154–173. doi.org/10.1016/j.tifs.2022.01.013
- [14] Ivankin A.N., Berdutina A.V., Neklyudov A.D. Ob jekologicheskoj bezopasnosti pishhevyh produktov. On the ecological safety of food products. *Ecological Systems and Devices*, 2001, no. 8, pp. 39–44.
- [15] Ivankin A.N., Berdutina A.V., Neklyudov A.D. *Ob ekologicheskoy bezopasnosti pishchevykh produktov* [Properties and uses of protein hydrolysates (Review)]. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Applied Biochemistry and Microbiology], 2000, v. 36, no. 5, pp. 452–459. doi.org/10.1007/BF02731888
- [16] Lu X., Ma R., Qiu H., Sun C., Tian Y. Mechanism of effect of endogenous/exogenous rice protein and its hydrolysates on rice starch digestibility. *International J. of Biological Macromolecules*, 2021, v. 193 A, no. 12, pp. 311–318. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.140
- [17] Jain B.M., Badve M.P. A novel process for synthesis of soybean protein hydrolysates and study of its effectiveness as a biostimulant and emulsifier. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022, v. 174, no. 4, 108880. doi.org/10.1016/j.cep.2022.108880
- [18] Hea W., Guo F., Jiang Y., Liu X., Chen J. Enzymatic hydrolysates of soy protein promote the physicochemical stability of mulberry anthocyanin extracts in food processing. *Food Chemistry*, 2022, v. 386, no. 8, 132811. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132811
- [19] Petrova I., Tolstorebrov I., Zhivlyantseva I., Eikevik T.M. Utilization of fish protein hydrolysates as peptones for microbiological culture medias. *Food Bioscience*, 2021, v. 42, no. 8, 101063. doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101063
- [20] Neklyudov A.D. *Vydelenie kollagenov iz organov i tkaney mlekopitayushchikh* [Isolation of collagens from organs and tissues of mammals]. *Ecological Systems and Devices*, 2005, no. 11, pp. 27–36.
- [21] Neklyudov A.D. *Biologicheskie svoystva aromaticheskikh, geterotsiklicheskikh, alifaticeskikh aminokislot* [Biological properties of aromatic, heterocyclic, aliphatic amino acids]. *Antibiotiki i khimioterapiya* [Antibiotics and Chemotherapy], 1990, v. 35, no. 5, pp. 51–58.
- [22] Saha B.C., Hayashi K. Debittering of protein hydrolysates. *Biotechnology Advances*, 2001, v. 19, no. 5, pp. 355–370. doi.org/10.1016/S0734-9750(01)00070-2
- [23] Baburina M.I., Gorbunova N.A., Ivankin A.N. *Fermentativnaya defragmentatsiya kostnogo syr'ya dlya polucheniya vysokokachestvennogo belkovogo produkta* [Enzymatic defragmentation of bone raw materials to obtain a high-quality protein product]. *Myasnaya industriya* [Meat Industry], 2021, no. 12, pp. 14–18. doi:10.37861/2618-8252-2021-12-35-39
- [24] Babini E., Tagliacucchi D., Martini S., Piu L.D., AndreaGianotti A. Identification of novel antioxidant peptides obtained by enzymatic and microbial hydrolysis of vegetable proteins. *Food Chemistry*, 2017, v. 228, no. 8, pp. 186–196. doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.143
- [25] Ivankin A.N., Neklyudov A.D., Proshina O.P. *Osobennosti kollagena v myasnom syr'e* [Features of collagen in meat raw materials]. *Myasnaya industriya* [Meat Industry], 2009, no. 1, pp. 59–63.
- [26] Ziero H.D., Ampese L.C., Sganzerla W.G., Torres-Mayanga P.C., Timko M.T. Subcritical water hydrolysis of poultry feathers for amino acids production. *The J. of Supercritical Fluids*, 2022, v. 181, no. 2, 105492. doi.org/10.1016/j.supflu.2021.105492
- [27] Zorin S.N., Mazo V.K., Vorob'eva I.S., Vorob'eva V.M., Asafov V.A. *Tekhnologiya polucheniya peptidnogo modulya na osnove gidrolizata belka soi* [Technology for obtaining a peptide module based on soy protein hydrolyzate]. *Pishchevaya promyshlennost'* [Food Industry], 2017, no. 10, pp. 20–23.
- [28] Shtilman M.I., Podkorytova A.V., Ivankin A.N. et al. *Tehnologiya polimerov mediko-biologicheskogo naznachenija. Polimery prirodnoy proishozhdenija* [Technology of polymers for medical and biological purposes. polymers of natural origin]. Moscow.: Binom Publ., 2015. 328 p.
- [29] Guevara-Zambrano J.M., Verkempinck S.H., Hernandez-Ruiz L., Infantes-Garcia M.R., Hendrick M.E., Loe A.M., Grauwet T. Digestion kinetics of lipids and proteins in plant-based shakes: Impact of processing conditions and resulting structural properties. *Food Chemistry*, 2022, v. 382, no. 7, 132306. doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132306
- [30] Liew C.S., Raksasat R., Rawindran H., Kiatkittipong W., Lim J.W. Hydrolysis kinetics for solubilizing waste activated sludge at low temperature thermal treatment derived from multivariate non-linear model. *Chemosphere*, 2022, v. 292, no. 4, 133478. doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133478
- [31] Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Zhilin Yu.N., Proshina O.P., Zarubina A.N., Vostrikova N.L., Kulikovskiy A.V., Baburina M.I. *Kinetika kislotnoy transformatsii prirodnykh polisakharidov drevesnoy biomassy v monosakhara dlya polucheniya kormovykh dobavok i mikrobiologicheskikh sred* [Kinetics of acid transformation of natural woody biomass polysaccharides into monosaccharides for obtaining feed additives and microbiological media]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 6, pp. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67
- [32] Yu Q., Baroutian S., Xie J. Hydrothermal co-hydrolysis of corncob/sugarcane bagasse/Broussonetia papyrifera blends: Kinetics, thermodynamics and fermentation. *Bioresource Technology*, 2021, v. 342, no. 12, 125923. doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125923

Author's information

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Member of the International Higher Education Academy of Sciences (IHEAS), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Received 18.04.2022.

Approved after review 21.09.2022.

Accepted for publication 21.11.2022.