

Л. И. Бутенко, Н. Н. Степанова, Д. А. Маркова,
Ж. В. Подгорная

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИСАХАРИДОВ ВЁШЕНКИ ОБЫКНОВЕННОЙ (PLEUROTUS OSTREATUS)

Ключевые слова: грибы вешенка, β -глюканы, полисахариды, физико-химические характеристики, поверхностное натяжение, полиамфолиты, поверхностная активность.

Незаслуженно оставлены без внимания грибы, которые наиболее часто применяются в кулинарной практике всех стран и культур. Поэтому объектом нашего исследования были выбраны грибы – Вёшенка, которые являются общедоступными, легко культивируемыми в любых регионах. Биологически активные классы, выделенные из вешенок, имеют широкий спектр фармакологической активности. В последнее время в литературе особое внимание уделяется полисахаридам. Целью нашего исследования было выделение полисахаридов из грибов вешенки обыкновенной и установление некоторых физико-химических характеристик. Полисахариды вёшенки представлены в основном целлюлозной фракцией, которую в литературе называют β -глюканами. Для полученных β -глюканов были установлены основные физико-химические характеристики, оказывающие влияние на биологическое поведение молекул. Среднюю молекулярную массу выделенных полисахаридов определяли вискозиметрическим методом. Установлено, что $M=5307$ г/моль, $M=23229$ г/моль. Определен коэффициент распределения β -глюканов между двумя жидкими фазами (водой и этилацетатом) с применением кондуктометрического метода, составляющий $K = 0,565$. Степень перехода β -глюканов в органическую фазу составила 63,9%. Поверхностную активность β -глюканов устанавливали методом наибольшего давления пузырьков воздуха с использованием прибора Ребиндера: поверхностная активность β -глюканов составляет $59,6 \cdot 10^{-3}$ Н·м²/моль. Таким образом, выделенные β -глюканы можно использовать в качестве стабилизаторов дисперсных систем. С помощью программы Graph версия 4.4.2. достоверно точно восстановлены эмпирические константы уравнения Шишковского, что подтверждается малым значением среднеквадратичной ошибки определения поверхностного натяжения ($MSE = 1,25 \cdot 10^{-3}$ Н/м). Определены параметры адсорбционного слоя β -глюканов: площадь, занимаемая молекулой ($S = 1,74 \text{ \AA}^2$), толщина слоя, соответствующая длине молекулы ($l = 5054,28 \text{ \AA}$) и объем ($V = 8794,45 \text{ \AA}^3$). В макромолекулах исследуемых глюканов содержится больше функциональных групп, проявляющих кислотные свойства, чем способных присоединять протоны. Для выделенных β -глюканов определили изоэлектрическую точку (ИЭТ = 4,2), значение которой меньше 7. Поэтому, можно утверждать, что β -глюканы вешенок являются полиамфолитами.

L. I. Butenko, N. N. Stepanova, D. A. Markova,
Zh. V. Podgornaya

STUDY OF SOME PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF POLYSACCHARIDES FROM COMMON OYSTER MUSHROOMS (PLEUROTUS OSTREATUS)

Keywords: oyster mushrooms, β -glucans, polysaccharides, physicochemical characteristics, surface tension, polyampholites, surface activity.

Mushrooms, which are most commonly used in the culinary practices of all countries and cultures, have been unjustly neglected. Therefore, we chose mushrooms – Veshonka, which are widely available and easy to cultivate in any region – as the subject of our study. Biologically active compounds isolated from Veshonka mushrooms have a wide range of pharmacological activities. Recently, special attention has been paid to polysaccharides in the literature. The aim of our study was to isolate polysaccharides from common oyster mushrooms and to establish some of their physical and chemical characteristics. Polysaccharides in oyster mushrooms are mainly represented by a cellulose fraction, which is referred to in the literature as β -glucans. The main physical and chemical characteristics of the obtained β -glucans that influence the biological behaviour of molecules were established. The average molecular weight of the isolated polysaccharides was determined by the viscometric method. It was established that $M = 5307$ g/mol, $M = 23229$ g/mol. The distribution coefficient of β -glucans between two liquid phases (water and ethyl acetate) was determined using the conductometric method, which was $K = 0.565$. The degree of transition of β -glucans into the organic phase was 63.9%. The surface activity of β -glucans was determined by the maximum air bubble pressure method using a Rebiner apparatus: the surface activity of β -glucans is $59.6 \cdot 10^{-3}$ N·m²/mol. Thus, the isolated β -glucans can be used as stabilisers of dispersed systems. Using Graph version 4.4.2, the empirical constants of the Shishkovsky equation were accurately restored, which is confirmed by the low value of the root mean square error of surface tension determination ($MSE = 1.25 \cdot 10^{-3}$ N/m). The parameters of the adsorption layer of β -glucans were determined: the area occupied by a molecule ($S = 1.74 \text{ \AA}^2$), the layer thickness corresponding to the molecule length ($l = 5054.28 \text{ \AA}$) and the volume ($V = 8794.45 \text{ \AA}^3$). The macromolecules of the studied glucans contain more functional groups exhibiting acidic properties than those capable of attaching protons. The isoelectric point (IEP = 4.2) was determined for the isolated β -glucans, which is less than 7. Therefore, it can be concluded that β -glucans from mushrooms are polyampholites.

Введение

Грибы являются одной из самых древних форм жизни на нашей планете – «Грибы старше динозавров». Несмотря на это, в официальной и народной

медицине европейских стран они редко рассматриваются как источник биологически активных соединений. Поэтому очень ярким событием в медицине оказалось открытие Александром Флемингом пени-

циллина. В настоящее время усилия современных исследователей в основном направлены на изучение биологически активных соединений в грибах, рекомендуемых Тибетской и Китайской медициной.

Незаслуженно оставлены без внимания грибы, которые наиболее часто применяются в кулинарной практике всех стран и культур. Поэтому объектом нашего исследования были выбраны грибы – Вёшенка, которые являются общедоступными, легко культивируемыми в любых регионах. Биологически активные классы, выделенные из вешенок, имеют широкий спектр фармакологической активности [1,2,3,4]. В последнее время в литературе особое внимание уделяется полисахаридам. Установлено, что полисахариды, далее называемые β-глюканами, активируют иммунную систему, причем именно те клетки иммунной системы, которые называют макрофагами и киллерами. По данным национального института раковых заболеваний, полисахариды вешенок способны останавливать рост или прогрессирование опухолей [5,6,7,8,9]. С заболеваниями сердечно-сосудистой системы связаны окислительный стресс, воспаление и высокий уровень холестерина. Благодаря способности к студнеобразованию β-глюканы способствуют снижению уровня «плохого» холестерина в крови [10,11,12,13,14]. В настоящее время установлено, что полисахариды обладают антимикробной и противораковой активностью.

Поэтому целью нашего исследования было выделение целлюлозной фракции из грибов вешенки обыкновенной и исследование некоторых физико-химических характеристик мажорной фракции полисахаридов. Задачи:

1. Определить различные виды вязкости растворов целлюлозной фракции для установления средней молекулярной массы β-глюканов.

2. Определить изоэлектрическую точку макромолекул β-глюканов, одну из важнейших характеристик полиамфолитов.

3. Изучить поверхностно-активные свойства органических полимеров, влияющие на скорость процессов, протекающих на границе раздела фаз.

4. Установить степень ассоциации и коэффициент распределения β-глюканов между водой и этилацетатом.

Объекты и методы исследования

Для исследования были выбраны плодовые тела грибов вёшенки обыкновенной производителя ИП Мельничева Я.Г. г. Челябинск, ТР ТС 022\2011 ТУ 9737-001-01963685343-2015. Грибы нарезали пластинками толщиной 2-4 мм. и высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы.

Методика получения отдельных фракций полисахаридов [15]. Для выделения водорастворимых полисахаридов (ВРПС), пектиновых веществ (ПВ) и β-глюканов из высушенных плодовых тел вешенки обыкновенной (*Pleurotus ostreatus*) использовали подход, описанный Кочетковым [15]. Процесс включал последовательную экстракцию каждой фракции специфическими растворителями:

– ВРПС извлекали дистиллированной водой;

– ПВ выделяли с помощью оксалатного буфера (смесь 0,5% раствора оксалата аммония и 0,5% раствора щавелевой кислоты в соотношении 1:1);

– β-глюканы экстрагировали 7% раствором гидроксида натрия.

После экстракции полисахариды осаждали добавлением двойного объема 96% этилового спирта. Образовавшиеся осадки отделяли и сушили в эксикаторе над концентрированной серной кислотой для удаления остаточной влаги.

Реологические исследования полученных полисахаридов.

Реологические свойства выделенных полисахаридов изучались через анализ их вязкостных характеристик. Для определения средней молекулярной массы β-глюканов применялся метод вискозиметрии [16]. Эксперимент включал следующие этапы:

1. Приготовление серии водных растворов полисахаридов с концентрациями в диапазоне 0,25–1,0% (объем каждого раствора — 15 мл).

2. Измерение времени истечения растворов через капиллярный вискозиметр Оствальда при контролируемой температуре (24°C).

3. Расчет ключевых параметров вязкости:

Относительная вязкость ($\eta_{отн}$) — отношение времени истечения раствора к времени истечения растворителя.

Удельная вязкость ($\eta_{уд}$) — разница между относительной вязкостью и единицей.

Приведенная вязкость ($\eta_{пр}$) — отношение удельной вязкости к концентрации.

Характеристическая вязкость ($[\eta]$) — экстраполяция приведенной вязкости к нулевой концентрации.

На основе полученных значений характеристической вязкости средняя молекулярная масса β-глюканов рассчитывалась по уравнению Марка-Хаувинка-Куна:

$$[\eta] = K \cdot M^a,$$

где K и a — эмпирические константы, зависящие от свойств полимера и растворителя.

Определение поверхностной активности β-глюканов проводили методом Ребиндера, заключающимся в измерении максимального давления, возникающего при проскакивании пузырька воздуха в воду и растворы ВМС различных концентраций [16].

Поверхностное натяжение полученных растворов рассчитывали по уравнению (1)

$$\sigma_x = \frac{\sigma_0 \cdot P_x}{P_0}, \quad (1)$$

Величину удельной адсорбции (поверхностный избыток Γ) рассчитывали по уравнению Гиббса (2):

$$\Gamma = -\frac{\Delta\sigma}{\Delta C} \cdot \frac{C}{RT}, \quad (2)$$

Определение изоэлектрической точки (ИЭТ) проводили вискозиметрическим методом с использованием капиллярного вискозиметра Оствальда.

Коэффициент распределения в системе этилацетат – вода устанавливали электрохимическим методом - кондуктометрии. Кондуктометрические исследования проводили на приборе кондуктометр марки

«Эксперт-002», с помощью которого измеряли удельную электрическую проводимость (κ) исходных растворов β -глюканов и растворов, оставшихся после проведения экстракции (рафинатов). Коэффициент распределения рассчитывали по уравнению Нернста с учетом степени ассоциации (n):

$$K = \frac{C_1}{C_2^n}, \quad (3)$$

Обсуждение результатов исследования

Определена средняя молярная масса β -глюканов, выделенных из вешенки, с применением вискозиметрического метода, $M=5307$ г/моль, $M=23229$ г/моль.

Установлено наличие поверхностной активности β -глюканов, которая составила $59,6 \cdot 10^{-3}$ Н·м²/моль. Таким образом, выделенные β -глюканы можно использовать в качестве стабилизаторов дисперсных систем.

С использованием программы Graph версия 4.4.2. достаточно точно восстановлены эмпирические константы уравнения Шишковского, что подтверждается малым значением среднеквадратичной ошибки определения поверхностного натяжения ($MSE=1,25 \cdot 10^{-3}$ Н/м).

Установлены ключевые характеристики адсорбционного слоя β -глюканов:

1. Площадь, занимаемая молекулами в слое: $S=1,74$ А²;
2. Толщина слоя, соответствующая длине молекулы: $l=5054,28$ А;
3. Объем: $V=8794,45$ А³.

В макромолекулах исследуемых глюканов содержится больше функциональных групп, проявля-

ющих кислотные свойства, чем способных присоединять протоны. Для выделенных β -глюканов определили изоэлектрическую точку (ИЭТ = 4,2), значение которой меньше 7. Поэтому, можно утверждать, что β -глюканы вешенок являются полиамфолитами.

Из высушенного измельченного сырья были получены три фракции полисахаридов:

ВРПС = 0,1%

Пектиновые вещества = 0,05%

Целлюлоза = 5%

Полисахариды вешенок представлены в основном целлюлозной фракцией, которую в литературе называют β -глюканами. Для полученных β -глюканов были установлены основные физико-химические характеристики, оказывающие влияние на биологическое поведение молекул. Для этого готовили их водные растворы, рекомендуемой концентрации не более 2%.

Растворение проводилось с предварительным «замачиванием» с последующим нагреванием (~ до 50°C) и перемешиванием на магнитной мешалке. Полисахариды незначительно растворимы в воде, склонны к увеличению объема и массы за счет впитывания воды, т.е. к ограниченному набуханию, что свойственно для полимеров с пространственной структурой.

После фильтрования не растворившейся целлюлозы остался водный раствор с концентрацией 1%, из которого методом разбавления была приготовлена серия растворов различной концентрации для определения средней молекулярной массы растворимой фракции β -глюканов. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения молекулярной массы на основе вязкости водных растворов β -глюканов вешенки

Table 1 – Results of molecular weight determination based on the viscosity of aqueous solutions of β -glucans from oyster mushrooms

Высокомолекулярное вещество:			β -глюканы вешенки		Температура 24°C	
№	Концентрация, С		Время истечения, t, с	$\eta_{отн}$	$\eta_{уд}$	$\eta_{пр}$
	%	«основной» моль				
H ₂ O	-	-	86,94	-	-	-
1	0,25	0,0155	87,44	1,006	0,006	0,387
2	0,37	0,0230	88,14	1,014	0,014	0,609
3	0,50	0,0310	88,52	1,018	0,018	0,581
4	0,75	0,0465	89,89	1,034	0,034	0,730
5	1,00	0,062	91,46	1,052	0,052	0,839
Характеристическая вязкость $[\eta] = 0,3245$				Молярная масса $M = 5307$ г/моль		

Относительную молекулярную массу ВМС рассчитывали с использованием уравнения Марка-Хаувинка-Куна. Данное уравнение связывает характеристическую вязкость $[\eta]$, экспериментально определенную графическим методом (см. рисунок 1), с молекулярной массой полимера.

При приготовлении водных растворов полисахаридов грибов осадок растворялся не полностью, по-

этому для полной картины исследования были получены растворы β -глюканов в 0,5 % растворе NaOH. Для полученных растворов были уточнены данные характеристической вязкости и средней молярной массы ВМС. Экспериментальные и расчетные данные представлены в табл. 2 и на рис. 2.

С использованием эмпирического уравнения Хаггинса определена k_h - константа Хаггинса, кото-

рая служит характеристикой интенсивности взаимодействия молекул полимера и растворителя. Полученное значение $k_L = 7,13$ на порядок меньше, чем для воды, что характеризует раствор NaOH как лучший растворитель по сравнению с водой, но по-прежнему термодинамически недостаточно эффективный.

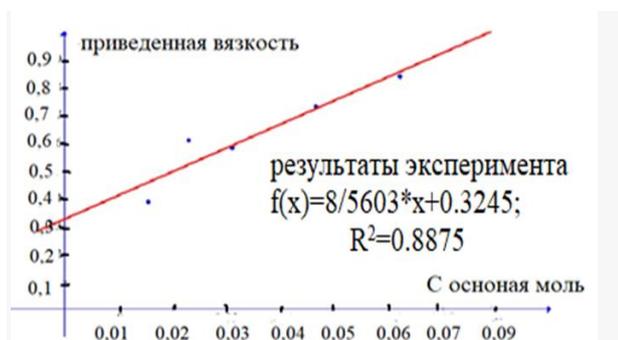


Рис. 1 – Определение характеристической вязкости водных растворов β-глюканов, выделенных из вешенки

Fig. 1 – Determination of the characteristic viscosity of aqueous solutions of β-glucans isolated from oyster mushrooms along the x-axis C ‘basic’, mol

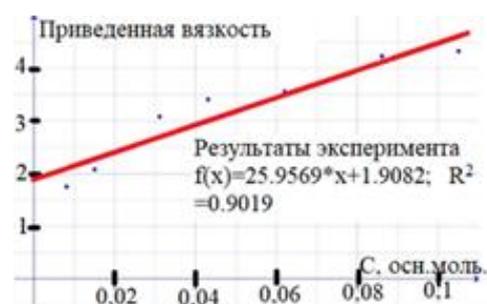


Рис. 2 – Определение характеристической вязкости растворов β-глюканов в 0,5 % NaOH, выделенных из вешенки

Fig. 2 – Determination of the characteristic viscosity of β-glucan solutions in 0.5% NaOH, isolated from oyster mushrooms

Известно, что многие природные полимеры являются поверхностно-активными веществами (ПАВ). Благодаря поверхностно-активным характеристикам, β-глюканы вешенки обладают способностью накапливаться на межфазной границе. Эти полимеры уменьшают силу поверхностного натяжения и существенно ускоряют биохимические процессы в живых системах. В связи с этим были проведены исследования поверхностно-активных свойств растворов β-глюканов, поскольку именно эти свойства играют ключевую роль в формировании их функциональных особенностей и определяют потенциальные сферы применения.

Таблица 2 - Вязкость водных растворов β-глюканов в вешенки в 0,5 % NaOH

Table 2 - Viscosity of aqueous solutions of β-glucans in oyster mushrooms in 0.5% NaOH

Высокомолекулярное вещество: глюканы вешенки				Температура 21°C		
№	Концентрация, С		Время истечения t, с	η _{отн}	η _{уд}	η _{пр}
	%	«основной», моль				
H ₂ O	-		97,930	-	-	-
1	0,125	0,008	99,100	1,014	0,014	1,752
2	0,25	0,015	100,98	1,031	0,031	2,076
3	0,50	0,031	107,08	1,096	0,096	3,086
4	0,70	0,043	112,30	1,147	0,147	3,412
5	1,00	0,062	119,31	1,221	0,221	3,561
6	1,40	0,086	133,28	1,364	0,364	4,230
7	1,70	0,105	142,11	1,454	0,454	4,325
Характеристическая вязкость [η] = 1,9082				Молярная масса М = 23229 г/моль		

Таблица 3 – Результаты изучения поверхностной активности растворов β-глюканов, выделенных из вешенки (поверхностного натяжения и удельной адсорбции)

Table 3 – Results of studying the surface activity of β-glucan solutions isolated from oyster mushrooms (surface tension and specific adsorption)

Исследуемые ПАВ: глюканы вешенки М = 5307 г/моль								Температура 24°C		
№	С, %	С, моль/м	ΔС, моль/м	Р, Па	σ · 10 ³ _{эксп.} , Н/м	Δσ · 10 ³ , Н/м	Γ · 10 ⁶ , моль/м ²	1/С	(1/Γ) · 10 ⁻⁶	σ · 10 ³ по Шишковскому, Н/м
H ₂ O	-	-	-	400	72,13	-	-	-	-	72,13
1	0,016	0,030	0,030	385	69,43	-2,70	1,09	33,33	0,917	70,52
2	0,031	0,058	0,028	380	68,52	-3,61	3,03	17,24	0,330	69,27
3	0,063	0,119	0,061	380	68,52	-3,61	2,85	8,40	0,351	67,09
4	0,094	0,177	0,058	370	66,72	-5,41	6,69	5,65	0,149	65,46
5	0,125	0,236	0,059	365	65,82	-6,31	10,22	4,24	0,098	64,09
6	0,19	0,358	0,122	340	61,31	-10,82	12,86	2,79	0,078	61,85
7	0,25	0,471	0,113	330	59,51	-12,62	21,30	2,12	0,047	60,23
8	0,375	0,707	0,236	310	55,90	-16,23	19,69	1,41	0,051	57,65
9	0,50	0,942	0,235	305	55,00	-17,13	27,81	1,06	0,036	55,72
10	0,75	1,413	0,471	285	51,39	-20,74	25,20	0,71	0,040	52,88
11	1,00	1,884	0,471	290	52,29	-19,84	32,14	0,53	0,031	50,81

Результаты измерения максимального давления, возникающего при проскакивании пузырька воздуха в воду и растворы ВМС различных концентраций, и рассчитанные величины поверхностного натяжения и удельной адсорбции представлены в таблице 3.

По экспериментальным данным построена изотерма поверхностного натяжения $\sigma = f(C)$, представленная на рисунке 3.

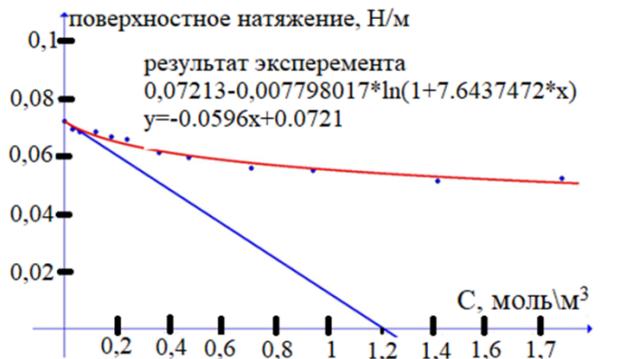


Рис. 3 – График изотермы поверхностного натяжения в зависимости от концентрации растворов β -глюканов, выделенных из вешенки

Fig. 3 – Graph of surface tension isotherms as a function of the concentration of β -glucan solutions isolated from oyster mushrooms

Как видно из рисунка 3, увеличение концентрации растворов β -глюканов приводит к мягкому снижению поверхностного натяжения. Можно сделать вывод, что выделенные из вешенки β -глюканы обладают поверхностно-активными свойствами. Для количественной оценки поверхностной активности β -глюканов вычисляли тангенс угла наклона касательной, проведённой к изотерме поверхностного натяжения. Касательная строилась из точки, соответствующей значению поверхностного натяжения чистого растворителя (см. рисунок 3). В результате было установлено, что поверхностная активность β -глюканов составила $59,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{моль}$. Поэтому выделенные β -глюканы можно использовать для коллоидной защиты.

Алгебраически изотерму поверхностного натяжения описывает эмпирическое уравнение Шишковского:

$$\sigma = \sigma_0 - a \cdot \ln(1 + bC), \quad (4)$$

в которое входят эмпирические константы a и b . Для их определения была использована программа Graph версия 4.4.2.

В результате получены значения:

$$a = 7,798 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}; b = 7,644 \text{ м}^3/\text{моль}.$$

Для проверки применимости в данном случае уравнения Шишковского были выполнены расчёты поверхностного натяжения растворов β -глюканов в диапазоне концентраций с использованием экспериментально установленных констант. Результаты приведены в таблице 3. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями, полученными по уравнению Шишковского, выявило высокую степень согласованности (см. таблицу 3). Это свидетельствует о том, что уравнение сохраняет

свою применимость для всего изученного интервала концентраций.

Так как полисахариды обладают адсорбционными свойствами, то для β -глюканов были определены параметры адсорбционного слоя. Для этого графическим методом установлена величина предельного поверхностного избытка (Γ_∞) (рисунок 4):

$$1/\Gamma_\infty = 0,0105 \cdot 10^6; \Gamma_\infty = 95,238 \cdot 10^{-6} \text{ моль/м}^2$$

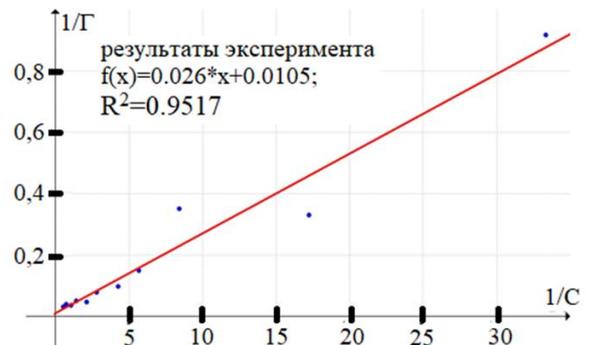


Рис. 4 – Изотерма адсорбции β -глюканов, выделенных из вешенки, в координатах $1/\Gamma = f(1/C)$

Fig. 4 – Isotherm of adsorption of β -glucans isolated from oyster mushrooms in coordinates $1/\Gamma = f(1/C)$

Найденная величина предельной адсорбции позволяет рассчитать параметры адсорбционного слоя β -глюканов:

а) площадь, занимаемую молекулой,

$$S = \frac{1}{\Gamma_\infty N_A} = 1,74 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2 = 1,74 \text{ \AA}^2, \quad (5)$$

б) длину молекулы, которая соответствует толщине адсорбционного слоя,

$$l = \frac{\Gamma_\infty M}{\rho} = 5054,28 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 5054,28 \text{ \AA}, \quad (6)$$

в) объем молекулы

$$V = Sl = 8794,45 \text{ \AA}^3, \quad (7)$$

В приведенных уравнениях $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$, M – средняя молярная масса β -глюканов ($M = 5,307 \text{ кг/моль}$), ρ – плотность раствора (10^3 кг/м^3).

Водные растворы β -глюканов, выделенных из вешенки, обладают электропроводностью, что позволяет классифицировать их как полиэлектролиты — полимеры с заряженными функциональными группами. Такие соединения находят применение в качестве структурообразователей, ионообменных материалов, ПАВ или загустителей. Макромолекулы β -глюканов относятся к углеводам и содержат vicinalные гидроксильные группы, проявляющие слабокислотные свойства. Наличие в их структуре как кислотных, так и основных групп относит эти полимеры к классу **полиамфолитов**, для которых характерно ИЭС — состояние с нулевым суммарным зарядом при определенном pH.

Экспериментально установлено, что ИЭТрастворов β -глюканов находится в кислой области ($\text{pH} < 7$). При достижении ИЭТ макромолекулы приобретают компактную глобулярную конформацию, что приводит к снижению вязкости растворов, уменьшению набухания и растворимости полимера.

Методика определения ИЭТ:

1. Приготовление 10 мл ацетатных буферных растворов с pH в диапазоне 3–6.

2. Добавление к каждому раствору 5 мл 1% водного раствора β-глюканов.

3. Определение относительной вязкости приготовленных растворов с использованием капиллярно-вискозиметра Оствальда.

По минимальному значению вязкости установили значение ИЭТ = 4,2, что подтверждает строение полисахаридов.

Коэффициент распределения β-глюканов между двумя жидкими фазами определяли методом кондуктометрии. Этот параметр отражает способность веществ проникать через клеточные мембраны.

Экспериментальная часть:

1. Приготовили серию растворов β-глюканов в 0,5% NaOH с начальными концентрациями C₀. Объем каждого раствора — 30 мл.

2. Провели экстракцию каждого раствора 30 мл этилацетата в течение 60 минут.

Расчет концентраций:

1. Удельную электропроводность растворов (как слабых электролитов) использовали для определения концентрации β-глюканов после экстракции (C₁).

2. Концентрацию в экстракте (C₂) рассчитывали по формуле C₂=C₀-C₁

Обработка данных:

Для оценки степени ассоциации (n) и коэффициента распределения (K) уравнение Нернста линеаризовали логарифмированием. График зависимости lg C₁=f(lg C₂) (рисунок 5) позволил определить:

– lg K — отрезок, отсекаемый на оси ординат (K_{сп}= 10^{-0,2496} = 0,563);

– n — тангенс угла наклона прямой.

Таблица 4 - Экспериментальные данные и результаты определения коэффициента распределения β-глюканов, выделенных из вешенок

Table 4 - Experimental data and results of determining the distribution coefficient of β-glucans isolated from oyster mushrooms

№	C ₀ , %	κ ₀ , мСм	κ ₁ , мСм	C ₁ , %	C ₂ , %	lg C ₁	lg C ₂	n	K _{граф}	K	α, %
1	0,0375	4,275	1,606	0,0141	0,0234	-1,85	-1,63	0,9867	0,563	0,573	63,9
2	0,075	8,38	3,089	0,0276	0,0474	-1,56	-1,32			0,559	
3	0,15	16,17	5,875	0,0545	0,0955	-1,26	-1,02			0,553	
4	0,3	30,37	11,12	0,1098	0,1902	-0,96	-0,72			0,565	
5	0,6	55,50	20,38	0,2203	0,3797	-0,66	-0,42			0,573	
									K _{сп} =	0,565	

Надежность полученных результатов подтверждается близостью значений коэффициента распределения, вычисленного по уравнению Нернста (K_{сп}=0,565) и определенного графическим методом (K_{сп}=0,563). Коэффициент K<1 указывает на высокую эффективность самопроизвольного перехода полисахаридов в органическую фазу в условиях постоянного давления и температуры. Степень извлечения β-глюканов в органическую фазу составила 63,9%. Возможность использования кондуктометрического метода свидетельствует о том, что выделенные из вешенок β-глюканы являются полиэлектролитами.

Выводы

Среднюю молекулярную массу выделенных полисахаридов определяли вискозиметрическим мето-

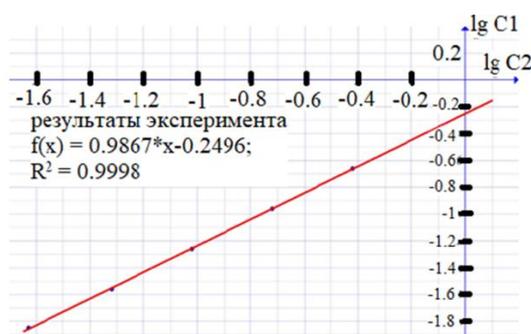


Рис. 5 – Графическое определение коэффициента распределения и степени ассоциации β-глюканов вешенок

Fig. 5 – Graphical determination of the distribution coefficient and degree of association of β-glucans in mushrooms

Установленная графически степень ассоциации дает возможность рассчитать коэффициент распределения β-глюканов, используя уравнение Нернста.

Эффективность перехода соединений в органическую фазу оценивали по уравнению (8):

$$\alpha = 1 - \frac{KV_1}{KV_1 + V_2} = \frac{1}{K + 1}, \quad (8)$$

где V₁ и V₂ – объемы исходного раствора и экстрагента соответственно (по 30 мл).

Результаты эксперимента, включая коэффициент распределения и степень извлечения β-глюканов, приведены в таблице 4.

дом. Установлено, что M=5307г/моль, M=23229 г/моль.

Установлено наличие поверхностной активности глюканов, которая составила 59,6·10⁻³ Н·м²/моль. Таким образом, выделенные β-глюканы можно использовать в качестве стабилизаторов дисперсных систем.

С помощью методов машинного обучения достаточно точно восстановлены эмпирические константы уравнения Шишковского, что подтверждается малым значением среднеквадратичной ошибки определения поверхностного натяжения (MSE = 1,25·10⁻³ Н/м).

Определены параметры адсорбционного слоя глюканов: площадь, занимаемая молекулой в адсорбционном слое (S = 1,74 Å²), толщина адсорбци-

онного слоя, соответствующая длине молекулы ($l = 5054,28 \text{ \AA}$) и ее объем ($V = 8794,45 \text{ \AA}^3$).

В макромолекулах исследуемых глюканов содержится больше функциональных групп, проявляющих кислотные свойства, чем способных присоединять протоны. Для выделенных β -глюканов определили изоэлектрическую точку (ИЭТ = 4,2), значение которой меньше 7. Поэтому, можно утверждать, что β -глюканы вешенок являются полиамфолитами.

Определен коэффициент распределения β -глюканов между двумя жидкими фазами (водой и этилацетатом) с применением кондуктометрического метода: $K = 0,565$. Степень перехода β -глюканов в органическую фазу составила 63,9%.

Заключение

Для полисахаридной фракции, выделенной из грибов вешенки обыкновенной, установлены некоторые физико-химические характеристики, позволяющие применять β -глюканы в качестве биологически активных веществ.

Литература

1. Е. В. Семенова, А. А. Козубенко, В. Р. Тюменцева и др., *Современные проблемы науки и образования*. — 2019. — №1. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29455>.
2. Maity Prasenjit, K. Sen Ipsita, Chakraborty Indranil et al., *National Library of Medicine*. — 2021. — №1. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33465360/> — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.081.
3. Sharma A., Tripathi A., *J Food Biochem*. 2021 Jun; **45**(6): e13748. doi: 10.1111/jfbc.13748.
4. Latronico T., Fanigliulo A., Crescenzi A., Liuzzi G. M., Rossano R., Petraglia T., *Molecules*. 2023 Feb **26**;28(5):2176. doi: 10.3390/molecules28052176. Molecules. 2023. PMID: 36903422Free PMC article.
5. Nair A., Kulkarni N., Todewale N., Jobby R., Fernandes A., *Int J Med Mushrooms*. 2023; **25**(2): 1-10. doi: 10.1615 .
6. C. P. Matheus, G. A. Natalia, R. P. L Bruno, *National Library of Medicine*. — 2023. — **23** (1): 356. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37805488/> — DOI: 10.1186/s12906-023-04190-7 Abstract.
7. Pvan Steenwijk Hidde, Bast Aalt, de Boer Alie, *National Library of Medicine*. — 2021. — **13**(4):1333. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33920583/> — DOI: 10.3390/nu13041333.
8. Sohretoglu Didem, Huang Shile, *National Library of Medicine*. — 2018. — **18**(5):667-674. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29141563/> — DOI: 10.2174/1871520617666171113121246.
9. Ahmad Md Faruque, *National Library of Medicine*. — 2020. — **5**: 260: 113047. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.8a212511-670eb3ae-6a5de7d8-74722d776562/https/pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32504783/ — DOI: 10.1016/j.jep.2020.113047.
10. Gao Xiaoli, *National Library of Medicine*. — 2023. — **23**(1):324. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38104078/> — DOI: 10.1186/s12935-023-03146-8.
11. Chi-Fung Chan Godfrey, Keung Chan Wing, Man-Yuen Sze Daniel, *National Library of Medicine*. — 2009. — **2**:25.

- URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19515245/> — DOI: 10.1186/1756-8722-2-25.
12. Xiao Zhiyong, Zhou Wenxia, Zhang Yongxiang, *National Library of Medicine*. — 2019. — **87**:277-299. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32089236/> — DOI: 10.1016/bs.apha.2019.08.003.
 13. Chen Wenhua, Tan Huiying, Liu Qian et al., *National Library of Medicine*. — 2019. — **24**(10):1888. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31100959/> — DOI: 10.3390/molecules24101888.
 14. K Panda Mrunmaya, Paul Manish, K Singdevsachan Sameer et al., *National Library of Medicine*. — 2021. — **22**(9):1164-1191. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33032507/> — DOI: 10.2174/1389201021666201008164056 .
 15. В.Н. Цветков, *Структура макромолекул в растворах*. Москва: Наука, 1964. 719 с.
 16. С.С. Воюцкий, *Курс коллоидной химии*: [Для хим.-технол. специальностей вузов]. Москва: Химия, 1975. 512 с.

References

1. E.V. Semenova, A.A. Kozubenko, V.R. Tyumentseva et al., *Modern problems of science and education*. — 2019. — №1. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=29455>
2. Maity Prasenjit, K., Sen Ipsita, Chakraborty Indranil et al., *National Library of Medicine*. — 2021. — №1. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33465360/> — DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.081
3. Sharma A., Tripathi A., *J Food Biochem*. 2021 Jun; **45**(6): e13748. doi: 10.1111/jfbc.13748.
4. Latronico T., Fanigliulo A., Crescenzi A., Liuzzi G.M., Rossano R., Petraglia T., *Molecules*. 2023 Feb **26**;28(5):2176. doi:10.3390/molecules28052176. Molecules. 2023. PMID: 36903422Free PMC article
5. Nair A., Kulkarni N., Todewale N., Jobby R., Fernandes A., *Int J Med Mushrooms*. 2023;**25**(2):1-10. doi: 10.1615/IntJMedMushrooms.2022046837.
6. C.P. Matheus, G.A. Natalia, R.P.L Bruno, Some new insights into the biological activities of *National Library of Medicine*. — 2023. — **23**(1):356. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37805488/> — DOI: 10.1186/s12906-023-04190-7 Abstract
7. Pvan Steenwijk Hidde, Bast Aalt, de Boer Alie, *National Library of Medicine*. — 2021. — **13**(4):1333. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33920583/> — DOI: 10.3390/nu13041333
8. Sohretoglu Didem, Huang Shile, *National Library of Medicine*. — 2018. — **18**(5): 667-674. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29141563/> — DOI: 10.2174/1871520617666171113121246
9. Ahmad Md Faruque, *National Library of Medicine*. — 2020. — **5**: 260: 113047. — URL: https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.8a212511-670eb3ae-6a5de7d8-74722d776562/https/pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32504783/ — DOI: 10.1016/j.jep.2020.113047
10. Gao Xiaoli, *National Library of Medicine*. — 2023. — **23**(1):324. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38104078/> — DOI: 10.1186/s12935-023-03146-8
11. Chi-Fung Chan Godfrey, Keung Chan Wing, Man-Yuen Sze Daniel, *National Library of Medicine*. — 2009. — **2**:25. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19515245/> — DOI: 10.1186/1756-8722-2-25

12. Xiao Zhiyong, Zhou Wenxia, Zhang Yongxiang, *National Library of Medicine*. — 2019. — **87**:277-299. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32089236/> — DOI: 10.1016/bs.apha.2019.08.003
13. Chen Wenhua, Tan Huiying, Liu Qian et al., *National Library of Medicine*. — 2019. — **24**(10):1888. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31100959/> — DOI: 10.3390/molecules24101888
14. K Panda Mrunmaya, Paul Manish, K Singdevsachan Sameer et al., *National Library of Medicine*. — 2021. — **22**(9):1164-1191. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33032507/> — DOI: 10.2174/1389201021666201008164056
15. Tsvetkov V.N. *The structure of macromolecules in solutions*. Moscow: Nauka Publ., 1964. 719 p.
16. Voyutsky S.S. *Course of colloidal chemistry: [For chemical and technological specialties of universities]*. Moscow: Khimiya Publ., 1975. 512.

© **Л. И. Бутенко** – канд. хим. наук, доцент кафедры Органической химии, Пятигорский медико-фармацевтический институт – филиал Волгоградского государственного медицинского университета (ПМФИ - филиал ВолгГМУ), Пятигорск, Россия, polechka2802@yandex.ru; **Н. Н. Степанова** – канд. фарм. наук, доцент кафедры Неорганической, физической и коллоидной химии, ПМФИ - филиал ВолгГМУ, stepanova131265@gmail.com; **Д. А. Маркова** – студентка 503 группы, ПМФИ - филиал ВолгГМУ, diana.antonyan2019@mail.ru; **Ж. В. Подгорная** – канд. фарм. наук, ООО Медифарм, Москва, Россия, podgornaya_janna@mail.ru.

© **L. I. Butenko** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Organic Chemistry, Pyatigorsk Medical and Pharmaceutical Institute - branch of the Volga State Medical University (PMPI - branch of the VSMU), Pyatigorsk, Russia, Polechka2802@yandex.ru; **N. N. Stepanova** – PhD (Pharmaceutical Sci.), Associate Professor, Department of Inorganic, Physical and Colloid Chemistry, PMPI - branch of the VSMU, stepanova131265@gmail.com; **D. A. Markova** – student of group 503, PMPI - branch of the VSMU, diana.antonyan2019@mail.ru; **Zh. V. Podgornaya** – PhD (Pharmaceutical Sci.), Deputy Director of Medipharm LLC, Moscow, Russia, j.podgornaya@imex-company.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 19.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 21.04.25.