

Статья поступила в редакцию: 13.08.2026

Статья принята к публикации: 18.08.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 664.38:547.96

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23320

**Исследование взаимодействия с водой и свойств набухания гелей на основе
изолятов соевого, горохового и фасолевого белков с использованием теории
Флори–Ренера**

Собуддинов Сохибжон Махмуджонович
докторант

Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Каноатов Хайрулло Муродиллаевич
д-р техн. наук

доц., Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

Дадамирзаев Музаффар Хабибуллаевич
канд. техн. наук

доц., Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: d_muzaffar@inbox.ru

Содикова Шоира Абдураззаковна
PhD

доц., Наманганский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Наманган

E-mail: sodikova_shoira@mail.ru

**Investigation of water interaction and swelling properties of gels based on soy,
pea and bean protein isolates using the Flory–Rehner theory**

Sobuddinov Sokhibjon
Doctoral Student

Namangan state technical university
Republic of Uzbekistan, Namangan

Kanoatov Khairullo
doctor of technical sciences, Associate Professor

Namangan state technical university
Republic of Uzbekistan, Namangan

Dadamirzaev Muzaffar
candidate of technical sciences, Associate Professor

Namangan state technical university
Republic of Uzbekistan, Namangan

Sodikova Shoir
PhD, Associate Professor

Namangan state technical university
Republic of Uzbekistan, Namangan

Аннотация

В статье исследованы закономерности сорбции воды, набухания и структурообразования белковых гелей на основе изолятов соевого, горохового и фасолевого белков. Актуальность исследования обусловлена необходимостью установления взаимосвязи между взаимодействием растительных белков с водой и структурными характеристиками гелевых систем, используемых при разработке альтернативных белковых продуктов. Цель исследования – установить закономерности взаимодействия соевого, горохового и фасолевого белков с водой, определить особенности набухания сформированных гелей и оценить влияние структуры белковой сетки на их функциональные свойства. Сорбционные свойства исследуемых белков оценивали методом динамической сорбции водяного пара, а термодинамическое взаимодействие белок-вода характеризовали параметром Флори-Хаггинса. Максимальную степень набухания однофазных гелей определяли после достижения равновесного состояния. Влияние структуры белковой сетки интерпретировали с использованием теории Флори-Ренера и модели Neo-Hookean. Установлено, что параметры взаимодействия белков с водой имеют близкие значения: $0,91 \pm 0,02$ для соевого, $0,90 \pm 0,02$ для горохового и $0,96 \pm 0,03$ для фасолевого белка. При повышении содержания сухих веществ степень набухания гелей снижалась. Несмотря на близкое родство исследуемых белков к воде, гели на основе фасолевого белка характеризовались меньшей степенью набухания, что может быть связано с особенностями пространственной организации белковой сетки и плотностью поперечных связей. Полученные результаты подтверждают взаимосвязь между взаимодействием растительных белков с водой, степенью набухания и структурными характеристиками гелей. Установленные закономерности могут служить научной основой для разработки гелевых систем на основе растительных белков с регулируемыми функциональными и текстурными свойствами, в том числе при создании полуфабрикатов аналогов мясных продуктов.

Abstract

This study investigates the patterns of water sorption, swelling, and structure formation of protein gels based on soy, pea, and bean protein isolates. The relevance of the study is обусловлена the need to establish the relationship between plant protein–water interactions and the structural characteristics of gel systems used in the development of alternative protein products. The aim of the study was to establish the patterns of interaction of soy, pea, and bean proteins with water, determine the swelling characteristics of the formed gels, and evaluate the effect of the protein network structure on their functional properties. The sorption properties of the investigated proteins were evaluated using dynamic water vapor sorption, while the thermodynamic protein–water interaction was characterized by the Flory-Huggins interaction parameter. The maximum swelling degree of single-phase gels was determined after reaching equilibrium. The effect of the protein network structure was interpreted using the Flory-Rehner theory and the Neo-Hookean model. The

Библиографическое описание: Исследование взаимодействия с водой и свойств набухания гелей на основе изолятов соевого, горохового и фасолевого белков с использованием теории Флори–Ренера // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Собуддинов С.М. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23320>

protein-water interaction parameters were found to have similar values: 0.91 ± 0.02 for soy protein, 0.90 ± 0.02 for pea protein, and 0.96 ± 0.03 for bean protein. An increase in dry matter content resulted in a decrease in the swelling degree of the gels. Despite the similar affinity of the investigated proteins for water, bean protein-based gels exhibited a lower swelling degree, which may be associated with differences in the spatial organization of the protein network and the density of cross-links. The obtained results confirm the relationship between plant protein–water interactions, gel swelling, and structural characteristics. The established patterns may serve as a scientific basis for developing plant protein-based gel systems with controlled functional and textural properties, including their application in the production of semi-finished meat analogue products.

Ключевые слова: изолят соевого белка, изолят горохового белка, изолят фасолевого белка, белковый гель, сорбция воды, коэффициент набухания, взаимодействие белка с водой, теория Флори-Ренера, растительные белки.

Keywords: soy protein isolate, pea protein isolate, bean protein isolate, protein gel, water sorption, swelling ratio, protein-water interaction, Flory-Rehner theory, plant proteins.

Введение

Развитие технологий пищевых продуктов на основе альтернативных источников белка сопровождается поиском способов целенаправленного формирования заданных структурно-механических и функциональных свойств. Одним из перспективных направлений является получение волокнистых белковых систем, способных имитировать характерную текстуру мясных продуктов. На промышленном уровне значительная часть таких продуктов производится методом высоковлажной экструзии, представляющей собой сложную термомеханическую обработку. Вместе с тем фундаментальные закономерности формирования внутренней структуры продукта и взаимосвязь между составом белковой композиции, условиями обработки и конечной текстурой изучены не в полной мере [6].

Для более глубокого изучения структурообразования биополимерных композиций применяются устройства типа сдвиговой ячейки (shear cell), в которых материал подвергается контролируемой сдвиговой деформации при заданной температуре. При сдвиговой обработке слои материала перемещаются относительно друг друга, что способствует деформации и ориентации дисперсной фазы. Показано, что формирование выраженной анизотропной структуры связано с наличием по меньшей мере двух взаимодействующих фаз и с ориентацией одной из них в направлении сдвига [9, 10].

Ранее исследовались композиции на основе соевого белка и глютена, соевого белка и пектина, а также горохового белка и глютена. Полученные данные показывают, что структурообразование определяется не только условиями термомеханической обработки, но и функциональными свойствами компонентов. В двухфазных системах существенное значение имеет формирование непрерывной сетки одной из фаз, которая способна механически ограничивать набухание другой фазы [7, 8].

С этой точки зрения анализ набухания представляет собой информативный инструмент для характеристики пространственной организации белковых гелей. Если различия в родстве белков к воде невелики, но коэффициенты набухания существенно различаются,

это может свидетельствовать о различной плотности сшивки или упругом сопротивлении полимерной сетки. Соевый и гороховый белки широко применяются в технологиях растительных аналогов мяса, тогда как бобовые белки, включая нутовый и фасолевый, рассматриваются как перспективные источники белка. Особенности формирования межмолекулярных связей могут различаться даже при близких реологических характеристиках гелеобразования [1, 5].

Для количественной интерпретации распределения воды в белковых системах целесообразно использовать теорию Флори–Ренера, согласно которой равновесное набухание определяется соотношением термодинамического взаимодействия полимера с растворителем и упругого сопротивления сшитой сетки. В настоящей работе это положение использовано для сопоставления характеристик сорбции воды и набухания однофазных белковых гелей [2].

Цель исследования - научно обосновать закономерности взаимодействия с водой и набухания гелей на основе изолятов соевого, нутового и фасолевого белков с использованием моделей Флори–Хаггинса и Флори–Ренера.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: определить характеристики сорбции водяного пара исследуемыми изолятами; оценить параметр взаимодействия белок–вода χ ; исследовать влияние содержания сухих веществ на максимальную степень набухания однофазных гелей; сопоставить полученные закономерности с положениями теории Флори–Ренера и оценить их значение для структурирования растительных белковых систем.

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовали пшеничный глютен и изоляты соевого, горохового и фасолевого белков. Массовая доля белка в исходных материалах, определённая с использованием коэффициента пересчёта $N \times 5,7$ и выраженная в пересчёте на сухое вещество, составляла соответственно 77,9; 84,0; 78,6 и 81,7 %. В качестве вспомогательных компонентов применяли хлорид натрия (NaCl) и умягчённую воду высокой степени очистки. Исходное сырьё и реагенты хранили при температуре 21 °С. Все эксперименты проводили в аналогичных условиях.

Методы исследования

Однофазные гели были получены из изолятов соевого (ИСБ), горохового (ИГБ) и фасолевого (ИФБ) белков по методу Cornet.

Белковый порошок диспергировали в рассчитанном количестве воды и перемешивали до получения однородной массы. После этого смесь деаэрировали под вакуумом 50 мбар в течение 45 с и выдерживали при температуре 4°С в течение 12-16 ч для полной гидратации белка. Гидратированную массу помещали в формы из нержавеющей стали внутренней высотой 5 мм и внутренним радиусом 12,5 мм. Герметично закрытые формы выдерживали 30 мин на вибрирующей водяной бане Julabo TW2, нагретой до 95°С. Затем образцы охлаждали в воде при температуре 15°С в течение 15 мин. Для последующего анализа отбирали только гели с однородной структурой и без внешних дефектов.

Определение максимальной степени набухания. Для удаления растворимых компонентов и определения максимальной способности гелей к набуханию также использовали метод Cornet. Образцы помещали в воду в соотношении 1:100 и выдерживали не менее 48 ч до стабилизации массы. Воду заменяли три раза. После достижения равновесного состояния содержание сухого вещества определяли высушиванием образцов при 105°C в течение 48 ч. Максимальную степень набухания оценивали как отношение объёма поглощённой воды к объёму полимерной фазы. При расчётах использовали плотность воды 1000 кг/м³ и плотность белка 1330 кг/м³. Для композитных систем вклад глютена принимали равным 1,5 г воды на 1 г белка глютена; это значение соответствовало термообработанному глютену в исследованных условиях. После вычитания вклада глютена оценивали степень набухания неглютеновой белковой фазы.

Определение сорбции водяного пара. При определении динамической сорбции водяного пара сорбционные свойства образцов по отношению к водяному пару исследовали с использованием эксикатора. Перед началом эксперимента образцы высушивали в течение 24 ч при относительной влажности 0 %. Затем относительную влажность постепенно увеличивали с шагом 10 % до достижения 90 %. На каждом этапе сорбционное равновесие считали достигнутым, если изменение массы образца в течение 120 мин при 10-минутных интервалах измерения составляло менее 0,005 % в минуту. Максимальная продолжительность каждого этапа была установлена на уровне 2000 мин.

Для оценки термодинамического взаимодействия белка с водой использовали параметр взаимодействия χ в рамках модели Флори-Хаггинса. Значения температуры стеклования сухих образцов, использованные при расчётах для белков фасоли и гороха в исходных материалах, составляли 436 и 438 К соответственно. Полученные параметры взаимодействия использовали для интерпретации распределения воды между белковыми фазами.

Равновесное набухание рассматривали в соответствии с теорией Флори-Ренера. В общем виде условие равновесия выражается через баланс давления смещения и упругого сопротивления полимерной сетки: при отсутствии внешнего давления осмотическая составляющая, обусловленная взаимодействием полимера с водой, уравнивается упругой составляющей сетки. Такой подход позволяет рассматривать наблюдаемую степень набухания как результат совместного влияния сродства белка к воде и плотности его пространственной сетки.

Для анализа деформации сшитой белковой сетки использовали модель Neo-Hookean, применяемую для описания больших деформаций упругих каучукоподобных материалов. В качестве исходного состояния рассматривали релаксированное состояние с коэффициентом набухания Q_{ref} . Максимальный коэффициент набухания Q_0 в принятой модели связывали с Q_{ref} соотношением $Q_0 = 1,5Q_{\text{ref}}$. При $Q > Q_{\text{ref}}$ сетка рассматривается как растянутая, при $Q < Q_{\text{ref}}$ - как сжатая, а при $Q = Q_{\text{ref}}$ - как находящаяся в ненапряжённом состоянии.

Статистическая обработка. Эксперименты выполняли в трёх повторностях. Результаты представляли в виде среднего значения и стандартной ошибки. При необходимости статистическую значимость различий оценивали однофакторным дисперсионным анализом. Критический уровень значимости принимали равным $p < 0,05$.

Результаты исследования и их обсуждения

Полученные изотермы сорбции показали близкий характер взаимодействия с водой для исследованных белковых изолятов. При активности воды выше 0,7 сорбционная способность соевого изолята была несколько выше, чем у изолятов гороха и фасоли. При этом различия не свидетельствовали о принципиально различном характере взаимодействия белковых матриц с водой.

Таблица 1.

Параметры взаимодействия белок-вода, рассчитанные по изотермам сорбции

Белковый изолят	Параметр взаимодействия χ	Интерпретация
Соевый (ИСБ)	$0,91 \pm 0,02$	Близкое сродство к воде
Гороховый (ИГБ)	$0,90 \pm 0,02$	Близкое сродство к воде
Фасолевый (ИФБ)	$0,96 \pm 0,03$	Близкое сродство к воде
Глютен	$1,16 \pm 0,04$	Более слабое взаимодействие с водой

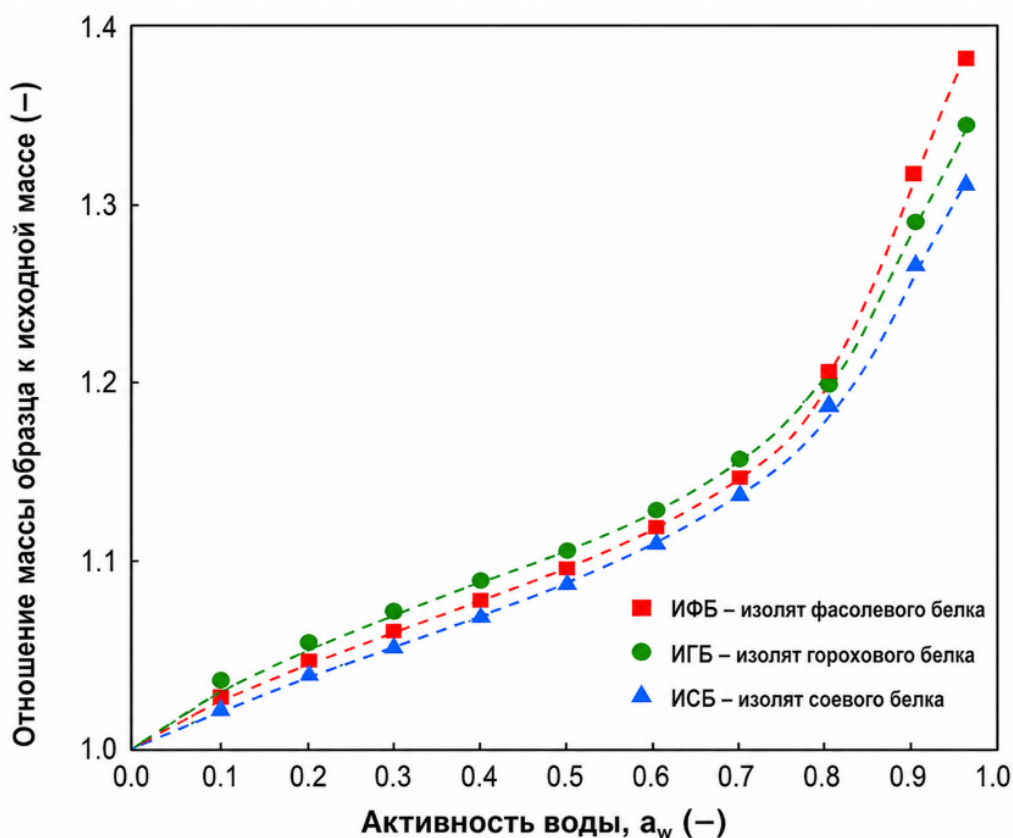


Рисунок 1. Изотермы сорбции водяного пара изолятами соевого (ИСБ), горохового (ИГБ) и фасолевого (ИФБ) белков при температуре 25°C

Из рисунка 1, видно что, изотермы сорбции водяного пара порошками изолята соевого белка (ИСБ), изолята горохового белка (ИГБ) и изолята фасолевого белка (ИФБ) при температуре 25°C. Значения параметра взаимодействия белок-вода (χ), рассчитанные с использованием модели Флори-Хаггинса, составили соответственно $0,91 \pm 0,02$ для ИСБ, $0,90 \pm 0,02$ для ИГБ и $0,96 \pm 0,03$ для ИФБ.

Исследование однофазных гелей показало закономерное снижение максимальной степени набухания при увеличении содержания сухих веществ в исходной системе. Полученная зависимость имела степенной характер. Увеличение концентрации белка при формировании геля приводит к более плотной пространственной организации белковой матрицы, вследствие чего свободный объём для проникновения воды уменьшается, а упругое сопротивление сетки возрастает.

Коэффициенты набухания гелей на основе соевого и горохового белков были близкими. Гели из фасолевого изолята характеризовались более низкой степенью набухания. При этом результаты сорбционных исследований показали близость параметров взаимодействия всех трёх белков с водой. Следовательно, наблюдаемое различие в макроскопическом набухании не может быть объяснено только различиями в сродстве белка к воде.

В соответствии с теорией Флори-Ренера равновесная степень набухания определяется конкуренцией между стремлением полимерной системы к смешению с растворителем и упругим сопротивлением сшитой сетки. Поэтому при близких значениях χ различная степень набухания может быть обусловлена различиями в плотности сшивки, длине участков сетки между узлами и способности белковых цепей к деформации.

Заключение

Результаты исследования показали, что однокомпонентные гели, сформированные на основе изолятов соевого, горохового и фасолевого белков, характеризуются сходными закономерностями взаимодействия с водой и набухания. Значения параметра взаимодействия белок–вода, определённые на основании изотерм сорбции водяного пара, составили $0,91 \pm 0,02$ для изолята соевого белка, $0,90 \pm 0,02$ для изолята горохового белка и $0,96 \pm 0,03$ для изолята фасолевого белка, что подтверждает близость характера взаимодействия данных белков с водой.

Максимальный коэффициент набухания однокомпонентных гелей снижался с увеличением содержания сухих веществ в процессе гелеобразования. Данная зависимость описывалась степенной функцией и характеризовалась различными параметрами для гелей на основе соевого, горохового и фасолевого белков. Коэффициенты набухания гелей на основе соевого и горохового белков были близкими, тогда как для гелей из изолята фасолевого белка наблюдалась относительно более низкая степень набухания.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что параметры взаимодействия исследованных белков с водой имеют близкие значения, различия в их набухающих свойствах могут быть преимущественно обусловлены различной плотностью поперечных связей в белковой гелевой сетке. Данный вывод согласуется с теоретическими положениями теории Флори-Ренера о влиянии структуры полимера, плотности поперечных связей и упругого сопротивления на степень набухания геля.

Таким образом, комплексная оценка сорбции воды и набухающих свойств изолятов соевого, горохового и фасолевого белков позволяет охарактеризовать структурное состояние гелей на их основе и регулировать их функциональные свойства. Выявленные закономерности могут служить научной основой для целенаправленного проектирования гелевых систем на основе растительных белков, в частности для формирования требуемой текстуры и структуры альтернативных белковых пищевых продуктов.

Список литературы

1. Дадамирзаев М.Х. и др. Рецептура и технология производства овощных паст нового направления // *Universum: технические науки*. – 2022. – С. 21–27.
2. Колпакова В.В. и др. Показатели качества гороховых и нуттовых белковых концентратов // *Техника и технология пищевых производств*. – 2022. – Т. 52. – С. 650–664.
3. Кучкаров У.М. и др. Using Wheat Germ Products to Enhance Quality of Ring-shaped Bread Industry // *Молодой ученый*. – 2016.
4. Рахимов У.Ю. и др. Использование порошка-полуфабриката, полученного из вторичного сырья соковых производств, в приготовлении мучных национальных изделий Узбекистана // *Молодой ученый*. – 2014. – С. 226–229.
5. Bakhsh A. et al. Evaluation of rheological and sensory characteristics of plant-based meat analog with comparison to beef and pork // *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*. – 2021. – Т. 41. – P. 983–996.
6. Dekkers B.L., Boom R.M. Van der Goot A.J. Structuring processes for meat analogues // *Trends in Food Science & Technology*. – 2018. – Т. 81. – P. 25–36.
7. Krintiras G.A. Intensified protein structuring for more sustainable foods [Электронный ресурс]. // Delft University of Technology, the Netherlands. itory. tudel ft. nl/islan dora/object/uuid: 03d60. – 2016. URL: <https://repos.ityr.tudelft.nl/islandora/object/uuid:03d60>. (дата обращения 27.08.2026)
8. Sha L., Xiong Y.L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges // *Trends in Food Science & Technology*. – 2020. – Т. 102. – P. 51–61.
9. Van der Sman R.G. M., Van der Goot A.J. The science of food structuring // *Soft Matter*. – 2009. – Т. 5. – P. 501–510.
10. Van der Sman R.G.M. Van der Sman R.G.M. Van der Sman R.G.M. Predictions of food polymer–water interactions and their consequences for food processing // *Journal of Food Engineering*. – 2013. – Т. 117.

References

1. Dadamirzaev M.Kh. i dr. [Formulation and production technology of vegetable pastes of a new direction] // *Universum: tekhnicheskie nauki*. – 2022. – P. 21–27. (In Russ.)
2. Kuznetsova O.V., Kudryashova O.V., Rozhkova E.V. i dr. [Quality indicators of pea and chickpea protein concentrates] // *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. – 2022. – Т. 52, № 4. – P. 650–664. (In Russ.)
3. Kushkarova U.M. i dr. [Using wheat germ products to enhance quality of ring-shaped bread industry] // *Молодой ученый*. – 2016. (In Russ.)
4. Rakhimov U.Yu. i dr. [Use of semi-finished powder obtained from secondary raw materials of juice production in the preparation of flour national dishes of Uzbekistan] // *Molodoj uchenyj*. – 2014. (In Russ.)

5. [Evaluation of rheological and sensory characteristics of plant-based meat analog with comparison to beef and pork] // Korean Journal for Food Science of Animal Resources. – 2021. – Т. 41. – P. 983–996.
6. Dekkers B.L., Boom R.M. Van der Goot A.J. [Structuring processes for meat analogues] // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – Т. 81. – P. 25–36.
7. Krintiras G.A. [Intensified protein structuring for more sustainable foods] // Delft University of Technology, the Netherlands. itory. tudel ft. nl/islan dora/object/uuid: 03d60. – 2016. – URL: <https://repos.> (accessed 27.08.2026)
8. Sha L., Xiong Y.L. [Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges] // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – Т. 102. – P. 51–61.
9. Van der Sman R.G.M., Van der Goot A.J. [The science of food structuring] // Soft Matter. – 2009. – Т. 5. – P. 501–510.
10. Van der Sman R.G.M. Van der Sman R.G.M. Van der Sman R.G.M. [Predictions of food polymer–water interactions and their consequences for food processing] // Journal of Food Engineering. – 2013. – Т. 117.