

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФУКОИДАНА ДЛЯ МИКРОКАПСУЛИРОВАНИЯ ПРОБИОТИЧЕСКИХ БАКТЕРИЙ

Резюме. В условиях отказа от антибиотиков-стимуляторов роста перед современным птицеводством стоит вопрос о повышении эффективности пробиотических добавок в кормлении цыплят-бройлеров. Одним из способов является микрокапсулирование. В работе обоснована перспектива применения фукоидана — полисахарида, выделенного из бурых морских водорослей *Fucus vesiculosus* в качестве полимерной структуры для микрокапсулирования пробиотических микроорганизмов. Экспериментально установлено, что матрица из альгината натрия (2%) и фукоидана (2%) в соотношении 1:5 формирует стабильные гидрогелевые структуры в 2 М растворе хлорида бария. В исследовании *in vitro* подтвержден пребиотический эффект фукоидана. Так, добавление в концентрации 1% стимулировало рост *Pediococcus acidilactici* в 1,93 раза ($P < 0,001$), а *Ligilactobacillus salivarius* — в 1,77 раза ($P < 0,001$) относительно контроля. Выявлено угнетение роста *Lactobacillus johnsonii*, что свидетельствует о штаммспецифичности фукоидана. Также установлено, что концентрация фукоидана выше 3% подавляет рост пробиотических бактерий. Разработанный подход сочетает защиту пробиотиков от агрессивных факторов желудочно-кишечного тракта, их адресную доставку и пребиотические свойства фукоидана, что открывает новые направления для птицеводства.

Ключевые слова: пробиотики, фукоидан, микрокапсулирование, адресная доставка, цыплята-бройлеры, пребиотики.

PROSPECTS FOR THE USE OF FUCOIDAN FOR THE MICROENCAPSULATION OF PROBIOTIC BACTERIA

Abstract. In the context of the rejection of antibiotic growth promoters in modern poultry farming, the issue of increasing the effectiveness of probiotic supplements in broiler chicken feed through microencapsulation remains relevant. This work substantiates the potential of using fucoidan, a polysaccharide isolated from the brown alga *Fucus vesiculosus*, as a polymeric matrix for the microencapsulation of probiotic microorganisms. It was experimentally determined that a composite matrix of sodium alginate (2%) and fucoidan (2%) in a ratio of 1:5 forms stable hydrogel structures in a 2 M barium chloride solution. In an *in vitro* study, the prebiotic effect of fucoidan was confirmed: its addition at a concentration of 1% stimulated the growth of *Pediococcus acidilactici* by 1.93 times ($P < 0.001$) and *Ligilactobacillus salivarius* by 1.77 times ($P < 0.001$) relative to the control. Inhibition of *Lactobacillus johnsonii* growth was identified, suggesting the strain-specificity of fucoidan action. It was found that fucoidan concentrations above 3% inhibit the growth of probiotic bacteria. The developed approach combines the protection of probiotics against aggressive gastrointestinal factors, their targeted delivery, and the prebiotic properties of fucoidan, which opens new directions for the poultry industry.

Key words: probiotics, fucoidan, microencapsulation, targeted delivery, broiler chickens, prebiotics.

УДК 663.15

Научная статья

DOI 10.69539/2413-287X-2026-09-4-287

ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА ЗВЕРЕВА¹,
старший преподаватель кафедры биохимии
и биотехнологии
ORCID: 0000-0002-7051-9858
E-mail: bond.vrn15@yandex.ru

МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ СЫРОМЯТНИКОВ¹,
кандидат биологических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории
метагеномики и пищевых биотехнологий
ORCID: 0000-0001-9028-0613
E-mail: mihan.vrn@mail.ru

ЛЮДМИЛА ЭДУАРДОВНА ГЛАГОЛЕВА¹,
доктор биологических наук,
профессор кафедры биохимии и биотехнологии
ORCID: 0000-0002-3222-301X

ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ КОРЧАГИН¹,
доктор технических наук,
профессор кафедры промышленной экологии
и техносферной безопасности
ORCID: 0000-0001-7212-1627
E-mail: korchagin.v@vsuet.ru

ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА КОРНЕЕВА¹,
доктор биологических наук,
проректор по научной и инновационной
деятельности, заведующая кафедрой
биохимии и биотехнологии
ORCID: 0000-0002-2863-0771
E-mail: korneeva-olgas@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
университет инженерных технологий»
394036, Россия, г. Воронеж,
проспект Революции, 19

Поступила в редакцию: 14.07.2026
Одобрена после рецензирования: 19.08.2026
Принята в публикацию: 04.09.2026

Работа выполнена в рамках государственного задания
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации (проект FZGW-2024-0003)

UDC 663.15

Research article

DOI 10.69539/2413-287X-2026-09-4-287

OLGA V. ZVEREVA¹,
Senior Lecturer at the Department
of Biochemistry and Biotechnology
ORCID: 0000-0002-7051-9858
E-mail: bond.vrn15@yandex.ru

MIKHAIL YU. SYROMYATNIKOV¹,
Candidate of Sciences in Biology,
Leading Researcher at the Laboratory
of Metagenomics and Food Biotechnology
ORCID: 0000-0001-9028-0613
E-mail: mihan.vrn@mail.ru

LYUDMILA E. GLAGOLEVA¹,
Doctor of Sciences in Biology, Professor at the
Department of Biochemistry and Biotechnology
ORCID: 0000-0002-3222-301X

VLADIMIR I. KORCHAGIN¹,
Doctor of Sciences in Engineering,
Professor at the Department of Industrial Ecology
and Technosphere Safety
ORCID: 0000-0001-7212-1627
E-mail: korchagin.v@vsuet.ru

OLGA S. KORNEEVA¹,
Doctor of Sciences in Biology,
Vice-Rector for Research and Innovation,
Head of the Department of Biochemistry
and Biotechnology
ORCID: 0000-0002-2863-0771
E-mail: korneeva-olgas@yandex.ru

²Voronezh State University of Engineering
Technologies
394036, Russia, Voronezh, Revolyutsii
Prospekt, 19

Received by editor office: 07.14.2026
Approved in revised: 08.19.2026
Accepted for publication: 09.04.2026

This work was carried out within the framework of the state
assignment of the Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation (project FZGW-2024-0003)



ВВЕДЕНИЕ

В промышленном птицеводстве одной из важных задач является поиск безопасных и эффективных альтернатив антибиотикам-стимуляторам роста, применение которых в ряде стран, включая Россию, ограничено или запрещено из-за риска формирования устойчивых штаммов патогенов, а также накопления остаточных веществ в продукции [1, 2]. В последнее десятилетие актуальной заменой антибиотикам выступают пробиотики — живые микроорганизмы, которые в адекватных количествах оказывают положительное влияние на здоровье организма-хозяина [3]. Особый интерес вызывают штаммы бактерий, выделенные из естественной микробиоты животных и обладающие пробиотическими свойствами [4, 5]. Известно, что бактерии родов *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* и *Enterococcus* способствуют поддержанию гомеостаза кишечной микробиоты, обладают естественными антимикробными свойствами, подавляют рост патогенной микрофлоры, стимулируют иммунитет и улучшают переваримость кормов [6]. Многочисленные исследования подтверждают, что использование пробиотиков в рационе цыплят-бройлеров повышает их сохранность и среднесуточные приросты, снижает заболеваемость желудочно-кишечными инфекциями [7, 8].

Одной из актуальных проблем в кормлении сельскохозяйственной птицы остается низкая эффективность пробиотических препаратов из-за снижения степени выживаемости бактерий в агрессивных условиях желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Проходя через кислую среду желудка (pH 1,5–3,5) и подвергаясь действию пищеварительных ферментов, значительная часть пробиотических бактерий гибнет, не достигая кишечника [9]. Таким образом, разработка эффективных систем, способных защитить пробиотики в верхнем отделе пищеварительного тракта и адресно доставить их в дистальные отделы кишечника, где бактерии смогут колонизировать слизистую и проявить свою физиологическую активность, является актуальной задачей. Для ее решения применяют метод микрокапсулирования, суть которого заключается в способности полисахаридов образовывать гелевые капсулы, внутри которых заключены пробиотики. Этот метод позволяет защитить активные вещества от агрессивных условий ЖКТ и в целостности доставить добавку в тонкий или слепые отделы кишечника, где они высвобождаются и оказывают полезное действие [10]. Для микрокапсулирования чаще всего используют альгинат натрия, пектин, каррагинан и хитозан из-за их мягкого и нетоксичного воздействия на клетки. Выделенный из клеточной стенки бурых морских водорослей полисахарид фукоидан сочетает в себе уникальные биологические свойства, что делает его идеальным кандидатом для создания микрокапсулированных пробиотических форм. Во-первых, полимерная структура фукоидана позволяет формировать стабильные микро-

капсулы в мягких условиях, во-вторых, он обладает выраженными пребиотическими свойствами. Известно, что присутствующие в составе фукуса бета-глюканы и фукоидан не ферментируются в желудке, но служат питательной основой для полезных микроорганизмов [11]. Фукоидан способствует увеличению роста бактерий и их метаболической активности, а также оказывает мощное иммуномодулирующее действие и тем самым стимулирует местный иммунитет кишечника. При применении кормов с добавлением полисахаридной фракции бурых водорослей (фукоидана) в дозировке 200 г/т наблюдалось усиление фагоцитоза в 2 раза и активности лизоцима на 26% [12]. Таким образом, комбинирование пробиотических микроорганизмов с матрицей из фукоидана — это инновационное направление, которое позволит одновременно решить проблему сохранности пробиотиков при транзите через ЖКТ и усилить их полезное действие за счет пребиотического и иммуномодулирующего потенциала данного полисахарида.

Цель настоящей работы — обосновать перспективы применения фукоидана в качестве полимерной основы для микрокапсулирования и оценить его пребиотический потенциал в отношении представителей микробиоты ЖКТ цыплят-бройлеров.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объекты исследования: фукоидан, выделенный из бурых морских водорослей *Fucus vesiculosus*, и пробиотические штаммы бактерий *Pediococcus acidilactice*, *Ligilactobacillus salivarius* и *Lactobacillus johnsonii*, ранее выделенные нами из кишечника цыплят-бройлеров [13]. Первоначально проводилась проверка способности фукоидана формировать плотные полисахаридные фракции методом эмульсии. В концентрации 2% он обладает способностью формировать плотные гелевые структуры только в 2 М растворе хлорида бария. Другие отвердители, применяемые для создания плотной оболочки, такие как сульфат алюминия 2 М, хлорид кальция 2 М и карбонат кальция 2 М, не показали положительной динамики при формировании полимерной структуры из фукоидана и проявляли сшивающую способность лишь в отношении альгината натрия. Обнаруженные ранее способности альгината натрия и фукоидана формировать полимерные структуры в хлориде бария стали основой для дальнейшего подбора процентных соотношений полисахаридов [14]. Были изучены различные соотношения альгината натрия (2%) и фукоидана (2%), способные образовывать гелевые структуры методом эмульсии в 2 М растворе хлорида бария.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывают результаты исследований (таблица), внесение фукоидана в питательную среду в концентрации

от 0,5 до 5% (в качестве контроля служила стандартная питательная среда MRS) оказывает выраженное стимулирующее действие на рост пробиотических бактерий *P. acidilactici*, *L. salivarius* и *L. johnsonii*. Максимальная численность жизнеспособных клеток отмечалась при содержании фукоидана в среде в количестве 1% (КОЕ/см³ 68,97 × 10¹¹), 1,5% (КОЕ/см³ 58,73 × 10¹¹) и 0,5% (КОЕ/см³ 17,40 × 10¹¹). При увеличении концентрации до 5% наблюдается подавление роста бактерий всех видов, что подтверждает его бактериостатическое действие. Сравнительный анализ показал: характер и выраженность ответа бактериальных культур на введение фукоидана носит штаммспецифичный характер. Полученные данные подтверждают его пребиотические свойства в отношении пробиотических бактерий и согласуются с результатами исследований других авторов [15].

Фукоидан в концентрации 2% продемонстрировал способность формировать плотные гидрогелевые структуры, однако для промышленного применения оптимальным является использование композитной матрицы на основе фукоидана и альгината натрия в соотношении 5:1.

Влияние фукоидана на жизнеспособность пробиотических бактерий

Концентрация фукоидана, %	Количество жизнеспособных бактерий, КОЕ/см ³ × 10 ¹¹		
	<i>Pediococcus acidilactice</i>	<i>Ligilactobacillus salivarius</i>	<i>Lactobacillus johnsonii</i>
0,5	62,17 ± 2,62***	32,30 ± 2,60**	17,40 ± 0,46**
1,0	68,97 ± 8,55***	55,07 ± 6,42**	14,30 ± 1,58**
1,5	29,17 ± 3,86**	58,73 ± 2,26***	3,47 ± 1,68**
2,0	33,67 ± 2,47**	57,33 ± 2,07**	3,27 ± 0,62**
3,0	28,73 ± 1,18**	22,37 ± 8,95**	0,87 ± 0,48*
4,0	24,67 ± 1,23**	21,93 ± 0,80*	0,77 ± 0,33*
5,0	21,47 ± 3,75*	16,70 ± 6,13*	0,63 ± 0,13*
Контроль	35,80 ± 0,55	33,23 ± 3,66	15,07 ± 3,12

*P < 0,05; **P < 0,01; ***P < 0,001.

Данная матрица обеспечивает формирование плотной структуры, сохраняющей свою стабильность на всех этапах технологического процесса, что может служить основой для создания микрокапсул для адресной доставки пробиотических культур при кормлении цыплят-бройлеров. ➡

Литература/Literature

- Argañaraz-Martínez, E. Probiotic applications of bifido-bacteria in poultry: administration methods and microencapsulation techniques / E. Argañaraz-Martínez, M. C. Apella [et al.] // Microbiome Res Rep. — 2025 Aug 22;4(3):32. — doi: 10.20517/mrr.2025.64.
- Agustono, B. Optimizing male layer chicken performance and health with probiotic supplementation: A sustainable alternative to antibiotic growth promoters / B. Agustono, M. N. Yunita [et al.] // Open Vet — J. 2025 Feb;15(2):668–679. — doi: 10.5455/OVJ.2025.v15.i2.15.
- Yang, X. The Application of Probiotics and Prebiotics in Poultry Production and Impacts on Environment: A Review / X. Yang, R. B. Bist [et al.] // Encyclopedia 2025, 5, 35. — https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010035.
- Melara, E. G. Characterization of Autochthonous Strains from the Cecal Content of Creole Roosters for a Potential Use as Probiotics. Animals (Basel) / E. G. Melara, M. C. Avelaneda [et al.] // 2023 Jan 28;13(3):455. — doi: 10.3390/ani13030455. PMID: 36766343; PMCID: PMC9913217.
- Siddique, A. Host associated probiotics *Lactobacillus reuteri* and *Enterococcus faecium* / A. Siddique, R. Ali, S. Andleeb [et al.] // Microbial Pathogenesis. — 2025. — Vol. 207. — P. 107859. — https://doi.org/10.1016/j.micpath.2025.107859.
- Zhang, S. Effects of probiotics on gut microbiota in poultry / S. Zhang, M. Yu, T. Zhao et al // AIMA Microbiology. — 2025. — Vol. 11, No. 3. — p. 754–768. — doi: 10.3934/microbiol.2025032.
- Wang, W. Dietary Supplementation of Compound Probiotics Improves Intestinal Health by Modulated Microbiota and Its SCFA Products as Alternatives to In-Feed Antibiotics / W. Wang, G. Dang [et al.] // Probiotics Antimicrob Proteins. — 2025 Aug; 17(4):1969–1984. — doi: 10.1007/s12602-024-10314-3.
- Wigoyo, I. A. Comparative analysis of probiotic interventions for improving productivity indicators in broiler chickens: A Global systematic Review / I. A. Wigoyo, D. Firanda, A. M. A. Ramadan [et al.] // Jurnal Ternak. — 2025. — Vol. 16, No. 2. — P. 208–221. — https://doi.org/10.30736/jt.v16i2.276.
- Guawali, I. A Review on enhancing gut health in poultry: probiotic stability, stress management and encapsulation strategies / I. Guawali // Poultry Science Journal. — 2024. — Vol. 12, No. 2. — P. 145–160. — doi: 10.22069/psj.2024.21959.2011.
- Guo, L. Synbiotic microencapsulation of *Lactiplantibacillus plantarum-lentinus* for enhanced growth in broilers / L. Guo, L. Yang [et al.] // AMB Expr 15, 128 (2025). — https://doi.org/10.1186/s13568-025-01929-y.
- Xueqing, Ye. Seaweed polysaccharides as multifunctional biotherapeutics in modulating gut microbiome, metabolic disorders and beyond: A review / Ye. Xueqing // International Journal of Biological Macromolecules. — Volume 372. 2026. — https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2026.153057.
- Qian-Qian, Liu. Fucoidan alleviates spleen damage in heat-stressed broilers by suppressing oxidative stress, ferroptosis and inflammation / Liu Qian-Qian // Poultry Science. — Volume 105. — Issue 8. 2026. — https://doi.org/10.1016/j.psj.2026.107022.
- Зверева, О. В. Идентификация и пробиотические свойства лактобактерий из кишечника цыплят-бройлеров / О. В. Зверева, Ю. П. Кузнецова, А. С. Вострикова [и др.] // Международный вестник ветеринарии. — 2025. — № 3. — С. 152–163. — DOI 10.52419/issn2072-2419.2025.3.152.
- Reddy, G.G. Effects of Crosslink Agents on Sodium Alginate and Lignosulphonic Acid Blends / G.G. Reddy // Polymer Korea — 2016. — doi: 10.7317/PK.2016.40.1.63.
- Zhou, Xu. In vitro fermentation characteristics of fucoidan and its regulatory effects on human gut microbiota and metabolites / Xu Zhou // Food Chemistry. — Volume 465. — Part 1. — 2025. — https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141998.

ВЫВОДЫ

Экспериментально был подтвержден пребиотический эффект фукоидана в отношении пробиотических бактерий, выделенных из цыплят-бройлеров. Установлено, что он проявляет штаммспецифичный характер. Для *P. acidilactici*, *L. salivarius* и *L. johnsonii* наиболее оптимальной его концентрацией в среде является 1%. В концентрации выше 3% фукоидан подавляет рост пробиотических культур, что свидетельствует о наличии пороговых значений, за пределами которых пребиотический эффект сменяется бактериостатическим действием.

Разработанный подход к микрокапсулированию пробиотиков на основе композиции фукоидана и альгината

натрия позволяет одновременно решить три ключевых аспекта: обеспечить защиту пробиотических культур микроорганизмов от агрессивных условий желудочно-кишечного тракта, осуществить их адресную доставку в дистальные отделы кишечника и усилить полезное действие за счет пребиотических и иммуномодулирующих свойств фукоидана. Такое совместное использование фукоидана и пробиотиков открывает новые перспективы для создания биологически активных веществ нового поколения, которые способны эффективно заменить антибиотики-стимуляторы роста в промышленном птицеводстве. ■