

Татьяна Григорьевна Волова¹, Светлана Владиславна Прудникова^{2✉},
Екатерина Игоревна Шишацкая³

^{1,2,3}Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

^{1,3}Институт биофизики СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

¹volova45@mail.ru

²sprudnikova.sfu@gmail.com

³shishatskaya@inbox.ru

КСАНТАН – ЦЕЛЕВОЙ ПРОДУКТ БИОТЕХНОЛОГИИ ПИЩЕВОГО, БИМЕДИЦИНСКОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Цель исследования – анализ современного состояния перспективных исследований и промышленных разработок в области выявления закономерностей синтеза и оптимизации условий получения ксантана, оценка мировых объемов производства и эффективности применения в различных областях. Ксантан обладает исключительными свойствами, включающими экологическую чистоту и биоразрушаемость, устойчивость к широкому диапазону температур, активной реакции и солености среды, неньютоновское поведение, высокую вязкость при низких концентрациях (600–2000 мг/л), устойчивость к механической деградации. Свойства ксантана обеспечили широкое применение в пищевой и кормовой, фармацевтической, косметической, биомедицинской, агрохимической, нефтяной промышленности в качестве загустителей, эмульгаторов, стабилизаторов суспензий и флокулянтов и прочих компонентов, улучшающих качество продуктов. В пищевой промышленности ксантан используют при изготовлении мясных и молочных продуктов, соусов, мороженого, желе и джемов, хлебобулочных изделий. Применение ксантана стабилизирует продукты, делает их структуру более пластичной, уменьшает потери влаги при обработке и хранении. Ксантан входит в состав фармпрепаратов, повышает качество и усвояемость кормов, повышает эффективность процессов нефтедобычи, имеет большие перспективы в биомедицине, клеточной и тканевой инженерии, в разработке материалов и биосистем для очистки стоков и охраны окружающей среды. Обзор содержит анализ научных публикаций и результатов интеллектуальной деятельности, включающих характеристики штаммов-продуцентов ксантана, результаты оптимизации состава питательных сред, условий биосинтеза ксантана, информацию о ведущих производителях ксантана и эффективности его применения.

Ключевые слова: ксантан, ксантановая камедь, штаммы-продуценты, *Xanthomonas campestris*, биосинтез, промышленное производство ксантана, области применения ксантана

Для цитирования: Волова Т.Г., Прудникова С.В., Шишацкая Е.И. Ксантан – целевой продукт биотехнологии пищевого, биомедицинского и технического назначения // Вестник КрасГАУ. 2025. № 6. С. 265–290. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-6-265-290.

Благодарности: исследование выполнено по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0287-2021-0025).

Tatyana Grigorievna Volova¹, Svetlana Vladislavna Prudnikova^{2✉},
Ekaterina Igorevna Shishatskaya³

^{1,2,3}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

^{1,3}Institute of Biophysics SB RAS Federal Research Center KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

¹volova45@mail.ru

²sprudnikova.sfu@gmail.com

³shishatskaya@inbox.ru

XANTHAN – A TARGET PRODUCT OF BIOTECHNOLOGY FOR FOOD, BIOMEDICAL AND TECHNICAL PURPOSES

The objective of the study is to analyze the current state of promising research and industrial developments in the field of identifying patterns of synthesis and optimizing the conditions for obtaining xanthan, assessing global production volumes and the effectiveness of its use in various fields. Xanthan has exceptional properties, including environmental friendliness and biodegradability, resistance to a wide range of temperatures, active reactions and salinity of the environment, non-Newtonian behavior, high viscosity at low concentrations (600–2000 mg/l), resistance to mechanical degradation. The properties of xanthan ensure its wide application in the food and feed, pharmaceutical, cosmetic, biomedical, agrochemical, oil industries as thickeners, emulsifiers, suspension stabilizers and flocculants and other components that improve the quality of products. In the food industry, xanthan is used in manufacture meat and dairy products, sauces, ice cream, jellies and jams, bakery products. The use of xanthan stabilizes products, makes their structure more flexible, reduces moisture loss during processing and storage. Xanthan is a part of pharmaceuticals, improves the quality and digestibility of feed, increases the efficiency of oil production processes, has great prospects in biomedicine, cell and tissue engineering, in the development of materials and biosystems for wastewater treatment and environmental protection. The review contains an analysis of scientific publications and the results of intellectual activity, including the characteristics of strains – producers of xanthan, the results of optimization of the composition of nutrient media, conditions for xanthan biosynthesis, information on leading manufacturers of xanthan and the effectiveness of its use.

Keywords: xanthan, xanthan gum, producing strains, *Xanthomonas campestris*, biosynthesis, industrial production, xanthan application areas

For citation: Volova TG, Prudnikova SV, Shishatskaya EI. Xanthan – a target product of biotechnology for food, biomedical and technical purposes. *Bulletin of KSAU*. 2025;(6):265-290. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-6-265-290.

Acknowledgments: the study was carried out under the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0287-2021-0025).

Введение. Биотехнологические процессы обеспечивают получение широкого спектра востребованных целевых продуктов пищевого, кормового, биомедицинского и технического назначения с использованием различных углеродных субстратов, включая отходы техносферы. Использование отходов в биотехнологических процессах является значимым вкладом в «The Circular Economy», направлено на снижении объемов накопления отходов в биосфере, повышение эффективности использования сырьевых ресурсов и промышленных производств.

Актуальным продуктом биотехнологии являются камеди, представляющие собой группу полисахаридов, которые при растворении в воде в низких концентрациях образуют вязкие растворы и гидрофильные коллоиды [1]. Особое место среди камедей принадлежит полисахариду ксантану – ксантановой камеди. Общепринятые синонимы и международные названия ксантановой камеди (ксантановая камедь, ксантан, ксантановая смола, ксантановый биополимер, ксантановый загуститель для буровых растворов, биополимер ксантановой смолы, биополи-

мер ксантан, загуститель ксантан, ксантановый загуститель, E415, Xanthan Gum). Ксантан, открытый в 1950-х гг. в Northern Regional Research Laboratories (NRRL) Министерства сельского хозяйства США [2], относится к одним из самых ранних и известных бактериальных экзополисахаридов. Обширные исследования ксантана были начаты в зарубежных промышленных лабораториях в 1960-х гг. Это завершилось созданием полукommerческого производства под названием Kelzan® компанией Kelco®. Коммерческие производства ксантана за рубежом стали активно создавать, начиная с 1964 г.

Ксантан как продукт микробного синтеза представляет собой экономически эффективную альтернативу полисахаридам растительного и животного происхождения. Связано это с тем, что бактерии синтезируют полисахариды в больших количествах в биотехнологических процессах с использованием различных субстратов, включая промышленные отходы, независимо от климатических и погодных условий, не требуя для этого больших площадей, без применения экстенсивных технологий выделения и очистки,

как это принято при выделении из растительного сырья. Бактерии, продуцирующие ксантан, распространены повсеместно и могут быть выделены обычными методами традиционной микробиологии из водных и наземных сред, таких как морская вода, сточные воды, почвы, растения, фрукты, овощи, микробиом кишечника и ферментированная пища [3, 4].

Рост спроса на ксантан связан с его широким применением – в производстве продуктов питания, агрохимии, косметологии, биомедицине, нефтедобыче и др. Спектр областей применения ксантана постоянно расширяется. Самые крупные промышленные производства ксантановой камеди созданы в Китае, США, Австралии и Канаде. Основными производителями являются Jungbunzlauer, ADM, Cargill, CP Kelco, Deosen Biochemicals, Fufeng Group, IFF (Dupont) и Meihua Group [5, 6]. Рыночная цена ксантана составляет 1500–4000 долларов США за тонну [7]. По сравнению с другими микробными полисахаридами ксантан конкурентоспособен по стоимости и, следовательно, является приоритетным вариантом с точки зрения производительности, а также в экономическом аспекте.

Начиная с 50-х гг. прошлого века и до настоящего времени в России и за рубежом активно исследуются различные аспекты биотехнологии ксантана, выделяют новые штаммы, привлекают более дешевые и доступные субстраты [8–13]. Значительный вклад в исследования, направленные на поиск продуцентов ксантана и разработку технологий его получения, вносят научные коллективы РФ, среди которых – кафедра биотехнологии, биохимии и биоинженерии (Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева); химический факультет МГУ, Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН; Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна; Кубанский сельскохозяйственный университет; ООО «Газпромнефть НТЦ» и др. Значимым событием стали представительные обзоры профессора А.И. Нетрусова и др. [3] и профессора В.В. Ревина и др. [14], в которых суммирован текущий прогресс исследований штаммов бактерий, продуцирующих различные экзополисахариды – бактериальную целлюлозу (полимер глюкозы), ксантан, леван, включая их характеристики и источники выделения. Обзор Н.А.Н. Ibrahim et al. [4] рассматри-

вает экзополисахариды, синтезируемые экстремофильными микроорганизмами, их синтез и оптимизацию производства для снижения стоимости и повышения производительности. В обзоре Е. Ефременко и др. [15] рассмотрены перспективы получения экзополисахаридов с применением каталитических биосистем на основе иммобилизованных клеток и ферментов.

В РФ промышленного производства ксантана до сих пор не создано, хотя планы обсуждаются с середины 2000-х гг. XXI в. На территории Технопарка «Мордовия» планировали создать предприятие мощностью 2 тыс. т ксантана в год, однако проект не реализован. В 2019 г. «Газпромнефть» планировала запустить проект по созданию производства ксантановой камеди, но он также не был реализован; остановлен аналогичный проект компании «Иннобиопром Юг». Активные исследования проводит Газпром («Промбиотех» и SioBio), который планирует проектирование и строительство завода мощностью 10 тыс. т ксантана в год. Обсуждается вопрос создания производства ксантановой камеди в Татарстане в ООО «АлНЭКо» (г. Альметьевск) [16].

Потребности РФ в ксантане – стратегическом для страны продукте биотехнологии – оценивают в 16 000 т в год (12 000 млн руб.). Объемы импорта ксантановой камеди, производимой в основном в Китае, растут. Согласно расчетам аналитиков DISCOVERY Research Group, объем рынка ксантановой камеди в России в 2019 г. составил 14,9 тыс. т, что на 3,3 % больше, чем в 2018 г., при этом 13 019,7 т, или 72,2 % от всего объема ввоза ксантана, будет предназначено для нефтегазовой промышленности [17].

Ключевые задачи, решение которых необходимо для наращивания объемов производства ксантана, повышения его доступности и расширения областей применения, включают необходимость поиска новых штаммов-продуцентов с широким органотрофным потенциалом, привлечение доступных углеродных субстратов, включая отходы, оптимизацию процессов ферментации и выделения ксантана из культуральной среды.

Цель исследования – анализ современного состояния перспективных исследований и промышленных разработок в области выявления закономерностей синтеза и оптимизации условий получения ксантана, оценка мировых объемов производства и характеристика областей применения.

Задачи: сбор и анализ результатов научных исследований и научно-практических разработок в области биотехнологического получения ксантана; характеристика физико-химических свойств, объемов промышленного производства и различных областей применения.

Объекты и методы: содержание научных публикаций и результаты интеллектуальной деятельности (РИД), включающие характеристики штаммов-продуцентов ксантана, результаты оптимизации состава питательных сред и условий культивирования, технологий выделения и получения готового продукта, информация о ведущих производителях ксантана и мировых объемах производства, а также данные эффективности применения ксантана в различных областях. Поиск публикаций и патентов для настоящего обзора выполнен по ключевым словам и их комбинациям в библиографических базах

данных и научных электронных библиотеках (Scopus, elibrary.ru, PubMed, Google Scholar) и открытых реестрах ФГБУ «Федеральный институт промышленной собственности» за период 2000–2024 гг.

Результаты и их обсуждение

Химическая структура и свойства ксантана. Ксантан – нетоксичный биоразлагаемый экзополисахарид, синтезируемый различными штаммами бактерий, по большей части представителями *Xanthomonas campestris* (Pammel 1895) Dowson 1939, с использованием сахаров в качестве источника углерода и энергии. Молекула ксантана состоит из повторяющихся пентасахаридных единиц, образованных D-глюкозой, D-маннозой и D-глюкуроновой кислотой в молярном соотношении 2,8 : 2,0 : 2,0 (рис. 1).

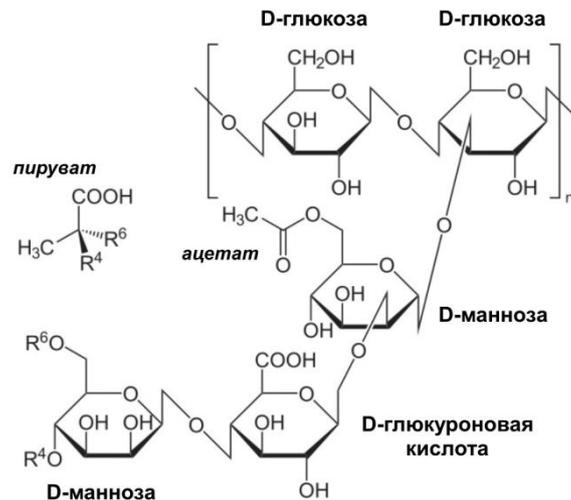


Рис. 1. Химическая структура ксантана
Chemical structure of xanthan

Основная цепь ксантановой камеди образована двумя молекулами D-глюкозы, связанными β -1,4 гликозидными связями, и трисахаридной боковой цепью. Боковая цепь образована молекулой D-глюкуроновой кислоты между двумя молекулами D-маннозы. Внутренняя манноза ацелирована и присоединена к каждой второй молекуле глюкозы в остове через α -1,2 гликозидные связи. Примерно половина конечных молекул маннозы содержит пировиноградную кислоту (пирувилманнозу). Звенья глюкуроновой кислоты связаны с D-маннозой через β -1,3 гликозидные связи. Эти боковые цепи перемежаются по всей основной цепи и различаются по

длине. Объединение этих отдельных моносахаридных компонентов наделяет ксантановую камедь ее исключительной структурой и свойствами. Боковые цепи маннозы обеспечивают разветвленность и гибкость молекулы, в то время как боковые цепи глюкуроновой кислоты способствуют ее анионному характеру. Наличие боковых цепей маннозы и глюкуроновой кислоты делает ее высокогидрофильной. Это свойство способствует ее загущающим и гелеобразующим способностям в водных растворах [18, 19].

Исключительные свойства ксантана включают неньютоновское поведение, высокую вязкость при низких концентрациях (600–2000 мг/л),

низкую чувствительность вязкости к изменениям солености, устойчивость к механической деградациии, стабильность по отношению к температуре (до 90 °С), биоразлагаемость и экологическую чистоту [19].

Растворы ксантана стабильны в широком интервале активной реакции среды, а также термостабильны, когда структура полимера упорядочена (при высокой ионной концентрации), но не стабильны, когда макромолекулярная структура неупорядоченная (при низкой ионной концентрации) [20].

При повышенных температурах ксантан демонстрирует конформационные изменения. Структура ксантана становится неупорядоченной, что приводит к снижению его вязкости и изменению его реологического поведения. Однако при более низких температурах он демонстрирует высокоупорядоченную и жесткую структуру из-за когезионного внутримолекулярного и межмолекулярного взаимодействия. Это обеспечивает ксантану его характерную вязкость и псевдопластичное поведение. Высокая молекулярная масса ксантановой камеди обуславливает его способность к загущению, а жесткость полимерных цепей делает их устойчивыми к механическому сдвигу при высокой солености и/или концентрации двухвалентных ионов. В водном растворе ксантан демонстрирует конформацию от порядка к беспорядку. В средах с различной концентрацией ионов макромолекулярная структура ксантановой камеди переходит от неупорядоченной конформации к более жесткой или упорядоченной структуре из-за эффекта экранирования заряда.

Штаммы-продуценты ксантана. Важная проблема, решение которой необходимо для повышения эффективности процессов биосинтеза ксантана, – поиск новых штаммов-продуцентов, обладающих высокими продукционными показателями и широким органо-трофным потенциалом, позволяющим использовать в качестве ростового субстрата различные источники углерода. Ксантан синтезируют бактерии рода *Xanthomonas*, принадлежащие к классу *Gamma*proteobacteria типа *Proteobacteria*. Типовой штамм – *X. campestris* ATCC 33913T. *X. campestris* чаще всего используется для промышленного производства ксантана, при этом существует несколько других видов рода *Xanthomonas*, которые могут синтезировать ксан-

тан, включая *X. pelargonii*, *X. phaseoli*, *X. Malvacearum*, *X. arbuticola*, *X. axonopodis* и *X. citri* [21–23]. Все представители рода *Xanthomonas* являются фитопатогенами и поражают широкий спектр растений, включая некоторые сельскохозяйственные, например капусту, люцерну и бобовые. Анализ эффективности производства ксантановой камеди с использованием потенциала различных видов *Xanthomonas* (*X. Arbuticola*, *X. axonopodis*, *X. campestris*, *X. citri*, *X. fragaria*, *X. gummisudans*, *X. juglandis*, *X. phaseoli* и *X. vasculorum*) показал, что самая высокая продукция и степень конверсии С-субстрата (80 %) у *X. campestris* [24].

В настоящее время исследованы метаболические, генетические и биохимические характеристики продуцентов ксантана, что позволяет создавать оптимальные условия культивирования для максимальной реализации биосинтетического потенциала штаммов. Выявлено, что продукция и качество ксантана зависят от многих параметров и переменных, включая состав питательной среды, тип источника углерода, температуру, pH, интенсивность массообмена по кислороду, объем и качество инокулята, метод культивирования, продолжительность ферментации и т. д.

Биотехнологический синтез ксантана. В большом массиве публикаций, включая обзоры, описаны найденные основные параметры биосинтеза ксантана и стратегии оптимизации его производства в промышленных масштабах, удовлетворяющих требованиям биоэкономики [25–29].

Для получения ксантана используют известные, хорошо отработанные и освоенные методы глубинного культивирования в ферментерах с перемешивающими устройствами. В промышленных масштабах ксантан получают путем погруженной аэробной ферментации в динамических условиях. Питательные среды, используемые для выращивания *X. campestris*, являются комплексными. Этому важному аспекту биотехнологии ксантана уделялось и уделяется большое значение [30–35]. Наиболее широко используемая среда – это среда «YM» [36] и полусинтетический вариант среды YM, обозначенный как «YM-T» [37, 38].

Питательная среда для получения ксантана составляется исходя из того, что концентрация компонентов, необходимая для роста клеток,

должна отличаться от состава среды, необходимого для суперпродукции ксантана. Для микробиологического синтеза ксантановой камеди необходимо несколько питательных веществ, прежде всего источники углерода (основной ростовой субстрат) и азота, а также соли калия, железа и кальция и др. Большинство штаммов-продуцентов ксантана усваивают сахара по укороченному пути Энтнера – Дудорова; известны также продуценты с пентозофосфатным путем метаболизма сахаров. Глюкоза и сахароза являются наиболее часто используемыми источниками углерода. Концентрация источника углерода оказывает значительное влияние на выход ксантана; принятая концентрация источника углерода – порядка 2–4 %; более высокие концентрации ингибируют рост бактерий [31, 39, 40]. Источником азота служат органические и неорганические формы [31, 41, 42]. Важное значение на стадии наращивания клеточной биомассы и стадии синтеза ксантана имеет соотношение C/N [31, 43]. Оптимизация условий суперпродукции ксантана показала, что рост отношения C/N в среде максимизирует выходы ксантана, накопление которого стимулируется лимитированием какого-либо минерального компонента конструктивного обмена микробного метаболизма [30, 44]. Рекомендованный оптимальный состав среды для производства ксантана, предложенный F. Garcia-Ochoa et al. [33], содержит следующий набор реагентов (г/л): сахароза (40,0), лимонная кислота (2,1), NH_4NO_3 (1,144), KH_2PO_4 (2,866), MgCl_2 (0,507), Na_2SO_4 (0,089), H_3BO_3 (0,006), ZnO (0,006), $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (0,020), CaCO_3 (0,020), концентрированная HCl (0,13 мл/л) и для стабилизации pH до 7,0 добавляется NaOH .

Влияние физико-химических параметров среды на рост *X. campestris* и выход ксантана изучены при разных температурах (от 25 до 35 °C) и активной реакции среды [9]. Установлено, что оптимальные условия для производства ксантана с использованием известных и эксплуатируемых штаммов *X. campestris* составляют 28–30 °C и pH 7–8 [45–48]. Нейтральные значения pH являются оптимальными для роста продуцентов ксантана, однако в процессе накопления ксантана в культуре pH снижается до 5 из-за кислотных групп, присутствующих в ксантане. Некоторые авторы рекомендуют производить корректировку pH, используя растворы щелочей (KOH , NaOH и NH_4OH), но другие авторы не считают контроль

pH необходимым. Так, в работе F. Garcia-Ochoa et al. [49] показано, что поддержание нейтральных значений pH при культивировании усиливает рост клеток, но производство ксантана прекращается после достижения стационарной фазы роста. Когда pH не контролируется, производство ксантана продолжается и во время стационарной фазы.

Для производства ксантана пригодны различные типы биореакторов, но наиболее распространены биореакторы с механическим перемешиванием, в которых скорость массопереноса кислорода зависит от скорости потока воздуха и скорости оборотов мешалки. Исследование различных стратегий массопереноса кислорода и насыщения культуральной среды кислородом показали, что скорость потока воздуха, как правило, следует поддерживать на постоянном уровне, обычно 1,0 л/л мин. Напротив, режим перемешивания культуральной среды, регулируемый скоростью вращения перемешивающего устройства, следует закономерно изменять по ходу развития культуры и изменения физиологического состояния и метаболизма микробных клеток – от более низких значений (200–300 об/мин) в начале ферментации при низкой концентрации клеток продуцента в культуре от момента засева, до более высоких значений (400–600 об/мин) по мере увеличения урожая биомассы клеток и ксантана, изменяющих плотность культуральной среды [50–52].

Разработка доступных питательных сред. Высокая стоимость питательных сред является ограничивающим фактором для экономического производства ксантана. Поэтому актуальный и важный аспект биопроцессов получения ксантана – решение проблемы снижения стоимости за счет расширения субстратных сценариев и применение различных источников углерода, помимо сахаров (глюкозы и сахарозы), включая отходы промышленности. Связано это с тем, что не менее 30 % от общих затрат на производство ксантана приходится на питательную среду, главным образом источник углерода [53]. Этот аспект биотехнологии ксантана – в перечне актуальных и важных исследований. До недавнего времени наиболее принятой для производства ксантана считали солевую среду с сахарозой [28], хотя известно, что источником углерода для производства ксантана могут служить

крахмалы (кукурузный, картофельный), которые имеют относительно высокую стоимость [10].

Поиску доступных источников углерода для ксантана уделяется большое и оправданное внимание. Рассматриваются следующие группы промышленных отходов, потенциально пригодных в качестве углеродного источника для биотехнологического получения востребованных полисахаридов: (1) отходы пивоваренной и безалкогольной промышленности; (2) агропромышленные отходы; (3) отходы лигноцеллюлозных биоперерабатывающих заводов, целлюлозных заводов и сахарной промышленности; (4) текстильные фабрики; (5) отходы промышленности по выращиванию микроводорослей; (6) отходы биодизельной промышленности [54].

Нарастающий поток публикаций свидетельствует о значимости проблемы поиска доступных субстратов для получения ксантана. Описаны различные типы отходов, опробованные в составе сред для выращивания продуцентов ксантана, включая кожуру фруктов и овощей, апельсиновую цедру [55]; отходы переработки моркови и тыквы [53]; гидролизаты отходов хлеба, а также различных кухонных отходов [56, 57]; щелочные гидролизаты гемицеллюлоз [58]; патока [59]; сыворотка производства сыра [60]; сточные воды ряда производств [61] и другое.

В качестве доступного углеродного субстрата для получения ксантана рассматривается глицерин – крупнотоннажный отход производства биодизеля. Особо привлекательным выглядит идея использовать наиболее дешевый неочищенный глицерин, так называемый «сырой» глицерин, который весьма активно исследуют для биосинтеза различных целевых продуктов биотехнологии. Однако такой глицерин содержит различные примеси (метанол, этанол, неорганические соли, металлы, длинноцепочечные жирные кислоты и мыла), которые токсичны для микроорганизмов, в том числе присутствие таких примесей в глицерине ингибирует развитие продуцентов [62]. Показано, что выход ксантана на этом доступном углеродном источнике, к сожалению, не превышает 7,6 и 11 г/л [63, 64].

В целом анализ литературы показывает актуальность и важность поиска доступных источников углерода, в том числе штаммов, толерантных к глицерину как перспективному субстрату для крупнотоннажного производства ксантана.

Способы выделения и очистки ксантана.

Следующая значимая проблема для оптимизации процессов производства ксантана – это выделение полисахарида из культуральной среды, очистка и высушивание. Высокая вязкость культуральной среды, содержащей ксантан, представляет собой серьезную проблему при извлечении биомассы бактериальных клеток из нее. Выделение ксантана из культуральной среды – сложный и дорогостоящий процесс. Конечная культуральная среда обычно содержит от 10,0 до 30,0 г/л ксантана, 1,0–10,0 г/л клеток продуцента, от 3,0 до 10,0 г/л остаточных компонентов питательной среды и экзометаболитов клеток [65]. С повышением концентрации ксантана культуральная среда становится очень вязкой, это затрудняет извлечение ксантана и отделение от биомассы клеток. Процесс является сложным, энергоемким из-за вязкости, для обработки культуральной среды ее обычно разбавляют [66]. Метод очистки ксантана определяется областью применения и экономикой. Использование ксантана для повышения нефтедобычи требует удаления частиц, таких как клетки, которые могут засорить пористую нефтеносную породу. Для использования в пищевых продуктах ксантан освобождает от микробных клеток и компонентов питательной среды.

Процесс выделения ксантана включает следующие этапы: 1) дезактивация и удаление (или лизис) микробных клеток; 2) осаждение ксантана; 3) обезвоживание; 4) сушка и измельчение [9]. Все процедуры должны исключать деградацию ксантана. Процесс осаждения ксантана выполняют с использованием растворителей (этанол, метанол, изопропиловый спирт, ацетон и т. д.). Совершенствование и оптимизация методов осаждения ксантана включают расширение перечня реагентов-осадителей, совершенствование последующего процесса извлечения ксантанового осадка с применением центрифугирования, ультрафильтрации. Заключительная стадия – высушивание (тепловое, распылительное, лиофильное).

Разбавление высоковязкого раствора ксантана предшествует фильтрации. Для разбавления применяют воду, спирт или смеси спирта и солей. Разбавленную культуральную среду фильтруют для удаления твердых частиц. Ксантан в растворе можно рассматривать как гидрофильный коллоид, образующий истинный

раствор в воде. Осаждение полимера достигается путем снижения растворимости коллоида при добавлении солей или смешивающихся с водой нерастворителей [67]; использования смесей солей и алкоголя [65]; осаждения с трехвалентными или четырехвалентными солями [66]. Наиболее распространенный метод первичного выделения и очистки ксантана – осаждение с использованием смешивающихся с водой спиртов. Однако стоимость спирта вносит значительный вклад в общую стоимость производства ксантана. Поэтому актуальная задача – снижение объемов расходуемого спирта или замена его на другие, более доступные реагенты. Например, поливалентные катионы (кальций, алюминий и четвертичные аммониевые соли) эффективны для осаждения ксантана. Использование спирта вместе с солями позволяет значительно сократить расходы спирта [65, 68]. Более существенно объемы реагентов уменьшаются при использовании спирта и двухвалентных солей, но при этом образуются менее растворимые соли ксантана. Применение спирта и одновалентных солей, например хлорида натрия 1,0 г/л, вдвое сокращает расход спирта. Усовершенствованию методов для производства ксантана уделяется большое внимание [69]. Мембранные процессы все чаще используются для концентрирования высоковязкой культуральной среды. Показано, что ультрафильтрация позволяет экономить до 80 % энергии, необходимой для извлечения ксантановой камеди [70]. Таким образом, направления для решения и оптимизации способов осаждения ксантана и выделения из культуральной среды для упрощения этих процедур и снижения затрат реагентов и энергии обозначены.

После осаждения ксантана его сушат под вакуумом или с принудительной циркуляцией инертного газа для предотвращения возгорания органического растворителя в осадке. После сушки ксантан измельчают до заданного размера для необходимой степени диспергирования и скорости растворения. При измельчении высушенного ксантана необходимо соблюдение осторожности, чтобы в процессе теплового высушивания не происходило разложение ксантана [42].

Коммерциализация и мировое производство ксантана. В России исследования по выделению штаммов-продуцентов ксантановой камеди и микробиологическому синтезу ксанта-

на проводятся с 2000-х гг., однако промышленные производства отсутствуют.

В Республике Татарстан разработан способ культивирования *X. campestris* NRRL B-1459 (депонирован в ВКПМ под номером B-611) на средах с сахарозой или свекловичной мелассой в качестве источника углерода с выходами ксантана до 15 г/л [71]. Запатентован способ получения ксантана при культивировании штамма *X. campestris* ВКПМ B-2228 на среде, содержащей гидролизованную щепу низкосортной древесины [72]. В Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева разработан способ получения ксантана штаммом *X. campestris* B-12968 от 9,5 до 15,6 г/л на средах с сахарозой, мелассой и кукурузным крахмалом [73]; на среде с агар-агаром выход ксантановой камеди повышен до 20,9 г/л [74]; разработан способ синтеза ксантана штаммом *X. theicola* B-11268, обеспечивающий выход 21,2 г/л на среде с сахарозой и 27,9 г/л – на среде с мелассой [75]; выделен новый штамм *X. campestris* B-3503D, синтезирующий ксантан на среде с мелассой с выходом ксантана до 27,9 г/л [76].

В ООО «Газпромнефть НТЦ» запатентованы способы получения ксантановой камеди с использованием штамма *X. fuscans* B-13738 при культивировании на средах с сахарозой и мелассой с выходом ксантана 29,5 и 24,2 г/л [77] и штамма *X. campestris* ВКМ-615 при использовании воды с пониженным содержанием дейтерия – на среде с глюкозой, мелассой и гидролизатом рыбной муки выход ксантана достиг 51,5 г/л [78]. В Кубанском сельскохозяйственном университете в ВКПМ зарегистрирован штамм *X. campestris* B-6720, в культуре которого на средах, содержащих экстракт отходов кукурузы, свекловичную мелассу или осахаренный крахмал, выход ксантановой камеди достигает от 17,4 до 20,1 г/л [79]. В УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина разработан способ синтеза ксантановой камеди при культивировании штамма *X. campestris* B-6720 (из коллекции ВКПМ) на ферментированном соевом молоке; выходы ксантана составили 8,8 г/л [80].

Зарубежные научные исследования и разработки, ориентированные на промышленный синтез ксантановой камеди, опередили РФ на несколько десятилетий. В Китае, США, странах Тихоокеанского региона и Северной и Южной Америки проводят активные исследования раз-

личных аспектов биотехнологии ксантана, имеют собственные штаммы продуценты, в основном природные штаммы *Xanthomonas campestris*, но также и генетически модифицированные микроорганизмы. В этих странах созданы и функционируют производства ксантановой камеди с различными объемами выпуска этого важного продукта; разработаны и запатентованы способы получения ксантановой камеди с различными выходами, от единиц до 20–30 г/л и более.

Зарегистрированы патенты на получение ксантановой камеди с использованием патоки сахарной свеклы в культуре *X. campestris* с выходами до 23 г/л [81]; методом ферментации с использованием тростникового сока с выходом ксантана от 20 до 36 г/л [82]; с использованием гидролизатов дрожжевой биомассы и выходами ксантана от 9,37 до 15,09 г/л [83]. Запатентован способ синтеза ксантановой камеди на стоках котловой воды с электростанции [84]; способ получения беспигментной ксантановой камеди с использованием беспигментного штамма *Xanthomonas* позволяет производить промышленную ксантановую камедь с высокой эффективностью без производства асептического флавиана с выходами 41,1 г/л [85]; запатентован способ получения ксантановой камеди в питательной среде с ограничением азота, серы или фосфора в культуре *X. campestris* и выходом ксантановой камеди 9,32 г/л [86]; метод получения улучшенной ксантановой камеди с использованием штамма *X. campestris* CFBP 176 [87]; известен способ получения высококачественного ксантана с использованием штаммов *X. campestris* NRRL B-12075 и NRRL B-12074 при непрерывном режиме культивирования [88]; запатентован процесс производства ксантановой камеди, растворимой в солевом растворе в культуре *X. campestris* [89]; известен способ получения ксантановой камеди с использованием в качестве сырья отходов патоки или маточного раствора отходов глюкозы [90].

Ксантан в настоящее время является одним из основных микробных экзополисахаридов, производимых в промышленных масштабах. Мировой объем производства ксантана значительно вырос с 2019 г. и достигает 50 000 т в год [91]. По различным оценкам рынок ксантановой камеди вырастет с 754,8 млн долл. США в 2024 г. до 996,3 млн долл. США к 2029 г. со

среднегодовым темпом роста 5,71 % [5]. Ожидается, что ее рыночная стоимость достигнет 1,2 млрд долларов США к 2030 г. На мировом рынке продаж ксантановой камеди лидируют США, Канада, страны Тихоокеанского региона, включая Китай, Австралию, Малайзию и Индию. Компании – лидеры среди мировых производителей ксантановой камеди [5, 6]:

– Archer Daniels Midland Company (США) – крупнейшая компания-производитель сельскохозяйственных культур и продуктов их переработки;

– Shandong Fufeng Fermentation Co., Ltd. (Китай) – пищевая и химическая компания, один из ведущих производителей ксантановой камеди в Китае;

– MeiHua Holdings Group Co., Ltd. (Китай) – пищевая, биофармацевтическая и химическая корпорация, крупный переработчик сельскохозяйственного сырья;

– CP Kelco (США) – производитель натуральных ингредиентов для пищевой промышленности;

– International Flavors & Fragrances, Inc. (IFF) (США) – крупнейший производитель ароматизаторов, отдушек и ингредиентов для пищевой промышленности и ее дочерняя компания Danisco (Дания);

– J.M. Huber Corporation (США) – корпорация, производящая потребительские и промышленные товары);

– Jungbunzlauer Suisse AG (Швейцария) – ведущий производитель натуральных ингредиентов для пищевой, фармацевтической, косметической промышленности.

Рост спроса на ксантан связан с его широким применением. Помимо нефтедобычи, значительный сегмент потребления приходится на пищевую и кормовую промышленности, а также фармацевтику, косметологию, медицину и другие области.

Области применения ксантана. Уникальные свойства ксантана обеспечили широкое применение в различных областях: пищевой, фармацевтической, косметической, химической, текстильной, нефтяной промышленности в качестве загустителей, эмульгаторов и стабилизаторов суспензий, флокулянтов и добавок, улучшающих качество различных продуктов (табл., рис. 2) [6, 9, 25].

Основные области применения ксантана (адаптировано из [9])
The main applications of xanthan gum (adapted from [9])

Область применения	Концентрация ксантана, % по массе	Эффект применения
Пищевая промышленность: заправки для салатов	0,1–0,5	Стабилизатор эмульсии; суспендирующий агент, диспергатор
сухие смеси	0,05–0,2	Облегчает диспергирование в горячей или холодной воде
сиропы, начинки, приправы, соусы	0,05–0,2	Загуститель; термостойкость и равномерная вязкость
напитки, соки	0,05–0,2	Стабилизатор
молочные продукты	0,5–0,2	Стабилизатор; контроль вязкости смеси
выпечка	0,1–0,4	Стабилизатор; повышает вязкость безглютеновых продуктов
замороженные продукты	0,05–0,2	Улучшает стабильность при замораживании-оттаивании
Фармацевтические препараты: кремы и суспензии	0,1–1	Стабилизатор эмульсии; однородность дозировки
Косметические средства: зубная паста, шампуни, лосьоны, крем	0,2–1	Загуститель и стабилизатор
Сельское хозяйство: добавка в корма для животных и пестицидные препараты	0,03–0,4	Стабилизатор суспензии; улучшенная распыляемость, повышенная адгезия и стойкость пестицида
Текстильная промышленность: печать и окраска тканей	0,2–0,5	Контроль реологических свойств пасты; предотвращение миграции красителя
Нефтяная промышленность: добыча нефти	0,1–0,4	Смазка для снижения трения
повышение нефтеотдачи пластов	0,05–0,2	Снижает подвижность воды за счет увеличения вязкости

**Потребность России в ксантане –
16 000 тонн в год 12 000 млн. руб.**

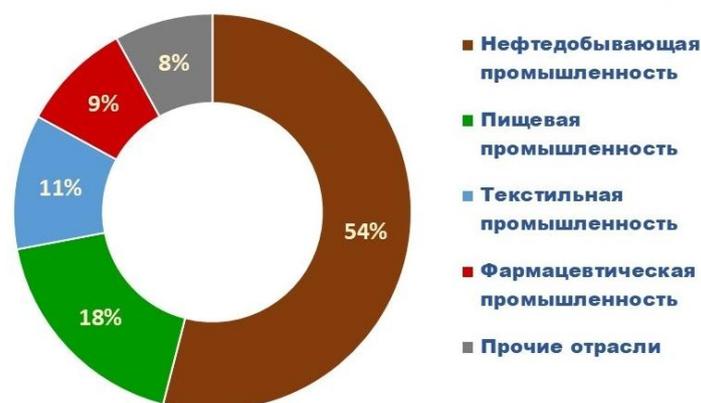


Рис. 2. Области применения ксантана
Xanthan application areas

Пищевая промышленность, диетическое питание. Токсикологические свойства ксантановой камеди были тщательно исследованы, и подтверждена ее безопасность для применения в пищевой промышленности и фармакологии. Ксантан не проявляет токсических свойств, не обладает аллергическим или раздражающим действием. В 1968 г. в США Управлением по контролю за продуктами и лекарствами (FDA) ксантан был разрешен для использования в качестве пищевой добавки [92]. В 1980 г. Европейское экономическое сообщество также включило ксантан в список пищевых эмульгаторов/стабилизаторов под номером E-415. В настоящее время его применяют в странах Европы, Америки, Тихоокеанского региона, в России и других странах.

Благодаря нейтральным вкусовым характеристикам ксантановая камедь не влияет на вкус и запах продуктов, но в то же время улучшает консистенцию, пластичность продуктов питания и стабилизирует их свойства. При изготовлении соусов, молочных продуктов, джемов и т.п. ксантан применяют как стабилизатор и загуститель [92]. Применение ксантана увеличивает вязкость и эластичность мясного фарша и колбасных изделий; уменьшает потери влаги при термообработке и хранении готовых продуктов; повышает устойчивость полуфабрикатов и замороженных продуктов к циклам замораживания/разморозка [93–95]. Ксантан также используют в качестве ингредиента в кондитерских, хлебобулочных изделиях, безглютеновых продуктах [96]. И еще одно направление – материал для упаковки пищевых продуктов [97–99].

Кормопроизводство и агрохимия. Помимо пищевой промышленности, ксантан применяют в сельском хозяйстве в кормопроизводстве в качестве кормовой добавки, загустителя влажных прикормов, а также при производстве пестицидных препаратов для защиты культивируемых растений от сорняков и фитопатогенов – возбудителей болезней. Добавки ксантана улучшают текучесть фунгицидов, гербицидов и инсектицидных составов путем равномерного суспендирования твердого компонента [54]. Уникальные реологические свойства раствора ксантановой камеди также уменьшают дрейф и увеличивают прилипание и стойкость пестицидов при нанесении на растения в период вегетации и проведения опрыскивания посевов. Агентство по охране окружающей среды США

выпустило различные «исключения из допустимых норм» для использования ксантановой камеди в качестве поверхностно-активного вещества в составах пестицидов.

Биомедицина и фармацевтика. Экологическая чистота ксантана и биоразрушаемость делает его перспективным материалом для использования в биомедицине в качестве перевязочных материалов [100–105], а также для решения задач клеточной и тканевой инженерии [106–112].

Высокая стабильность в широком диапазоне активной реакции среды, включая низкие значения, обеспечивает высокий потенциал ксантана для разработки систем депонирования и контролируемой доставки лекарственных средств в виде различных форм (гидрогели, матричные таблетки, пленки, микросферы) [113, 114]. Ксантан используют для доставки антибактериальных [115], противогрибковых [116], противовирусных [117] и противоопухолевых препаратов [118, 119].

В косметическом производстве ксантан применяется при изготовлении препаратов с увлажняющим действием, зубных паст, в производстве лосьонов, кремов, шампуней, кондиционеров в качестве пленкообразующего агента, в средствах для кондиционирования кожи, а также для восстановления и фиксации волос. Ксантановая камедь позволяет сочетать различные косметические ингредиенты, способствуя образованию смесей между несмешивающимися жидкостями и повышая стабильность эмульсий в системе «вода – масло» [120].

Нефтедобыча. Самые большие объемы ксантановой камеди (свыше 50 %) используют в нефтегазовой промышленности в составе буровых растворов. Применяют ксантан при вертикальном и горизонтальном бурении, в том числе скважин большого диаметра, в составе растворов для закачивания скважин и их ремонта, для вскрытия пласта, отбора кернов, в составе жидкости гидроразрыва, в качестве загустителя, а также для стабилизации эмульсий [18]. Одной из ключевых характеристик ксантановой камеди является ее высокая вязкость в сочетании с очень высокой псевдопластичностью, т. е. снижением вязкости с увеличением скорости сдвига, что облегчает закачку при заводнении нефтяных пластов. Кроме того, ксантан стабилен в широком диапазоне температур и pH, совместим с большинством солей металлов, раство-

рим в воде, но нерастворим в широком диапазоне органических растворителей, устойчив к деградации [19, 121, 122].

Окружающая среда. Ксантан рассматривают в качестве перспективного «зеленого» материала для производства суперабсорбентов и очистки загрязненных вод. Ксантан перспективен в качестве экологически чистого адсорбента для дезинфекции воды, в качестве почвенных кондиционеров и напочвенных покровов для стимуляции роста растений и защиты лесов [123–126].

Заключение. Выполненный сбор и анализ публикаций, РИД, а также обзор мирового рынка и результатов применения ксантана в реальном секторе экономики выявили современное состояние исследований и практических решений по теме обзора, обозначили ключевые проблемы, решение которых необходимо для повышения эффективности технологий получения ксантановой камеди, повышения ее доступности, которые включают: поиск, выделение и использование новых высокопродуктивных штаммов-продуцентов ксантана, обладающих

широким органотрофным потенциалом, способных метаболизировать и усваивать различные ростовые субстраты; подбор доступных источников углерода; оптимизацию состава питательной среды; оптимизацию параметров культивирования продуцента по активной кислотности, температуре среды, массопереносу кислорода; снижение затрат на получение ксантановой камеди за счет привлечения в качестве источника углерода новых и экономически целесообразных, в том числе неизученных промышленных крупнотоннажных отходов; оптимизацию процессов осаждения и выделения ксантановой камеди из культуральной среды по критериям оптимизации, включая эффективность осаждения, полноту выделения и снижение затрат реагентов и энергоносителей. Решение этих ключевых проблем направлено на повышение эффективности промышленного биотехнологического производства ксантана, включая реализацию созданных в РФ научных заделов для создания промышленного производства этого важного стратегического продукта в РФ.

Список источников

1. Pu W., Shen C., Wei B., et al. A comprehensive review of polysaccharide biopolymers for enhanced oil recovery (EOR) from flask to field // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018. Vol. 61. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.12.034. EDN: VEBPVC.
2. Margaritis A., Zajic J.E. Biotechnology review: mixing mass transfer and scale-up of polysaccharide fermentations // *Biotechnology and Bioengineering*. 1978. Vol. 20. P. 939–1001. DOI: 10.1002/bit.260200702.
3. Netrusov A.I., Liyaskina E.V., Kurgaeva I.V., et al. Exopolysaccharides producing bacteria: a review // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. P. 1541. DOI: 10.3390/microorganisms11061541.
4. Ibrahim H.A.H., Abou Elhassayeb H.E., El-Sayed W.M.M. Potential functions and applications of diverse microbial exopolysaccharides in marine environments // *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 2022. Vol. 20, № 1. P. 151. DOI: 10.1186/s43141-022-00432-2.
5. Анализ размера и доли рынка ксантановой камеди – тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.) Доступно по: <https://mordorintelligence.com/ru/industry-reports/xanthan-gum-market>. Ссылка активна на 27.01.2025.
6. Berninger T., Dietz N., González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics // *Microbial Biotechnology*. 2021. Vol. 14, № 5. P. 1881–1896. DOI: 10.1111/1751-7915.13867.
7. Chang I., Lee M., Tran A.T.P., et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices // *Transportation Geotechnics*. 2020. Vol. 24. P. 100385. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100385.
8. Becker A., Katzen F., Pühler A., et al. Xanthan gum biosynthesis and application: a biochemical/genetic perspective. Review // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1998. Vol. 50, № 2. P. 145–152. DOI: 10.1007/s002530051269.
9. García-Ochoa F., Santos V.E., Casas J.A., et al. Xanthan gum: production, recovery, and properties // *Biotechnology Advances*. 2000. Vol. 18, № 7. P. 549–579. DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00050-1.

10. Rosalam S., England R. Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas campestris* sp. // Enzyme and Microbial Technology. 2006. Vol. 39, № 2. P. 197–207. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2005.10.019.
11. Barua R., Alam M.J., Salim M., et al. Small scale production and characterization of xanthan gum synthesized by local isolates of *Xanthomonas campestris* // Indian Journal of Experimental Biology. 2016. Vol. 54, № 2. P. 151–155. Available at: <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/33746>. Accessed: 27.01.2025.
12. Kumar A., Rao K.M., Han S.S. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 180. P. 128–144. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.10.009.
13. Dey R., Chatterji B.P. Sources and methods of manufacturing xanthan by fermentation of various carbon sources // Biotechnology Progress. 2023. Vol. 39, № 6. P. e3379. DOI: 10.1002/btpr.3379.
14. Revin V.V., Liyaskina E.V., Parchaykina M.V., et al. Production of bacterial exopolysaccharides: xanthan and bacterial cellulose // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24, № 19. P. 14608. DOI: 10.3390/ijms241914608.
15. Efremenko E., Senko O., Maslova O., et al. Biocatalysts in synthesis of microbial polysaccharides: Properties and development trends // Catalysts. 2022. Vol. 12, № 11. P. 1377. DOI: 10.3390/catal12111377.
16. В РФ заместят импорт важнейшего компонента для нефтяной и пищевой промышленности. Информангентство «Девон». Доступно по: https://iadevon.ru/news/oil/v_rf_zamestyat_import_vazhneyshego_komponenta_dlya_neftyanoy_i_pishchevoy_promishlennosti-13174. Ссылка активна на 03.02.2025.
17. Анализ рынка ксантановой камеди в России. Аналитический отчет DISCOVERY RESEARCH GROUP. Доступно по: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_Kamed.PDF. Ссылка активна на 02.02.2025.
18. Магадова Л.А., Потешкина К.А., Давлетшина Л.Ф., и др. Ксантан как универсальный полимер для нефтегазодобычи и продукт биотехнологии // Нефтегазовое дело. 2023. № 5. С. 55–82. DOI: 10.17122/ogbus-2023-5-55-82. EDN: KLOBK.
19. de Souza E.R., Rodrigues P.D., Sampaio I.C., et al. Xanthan gum produced by *Xanthomonas campestris* using produced water and crude glycerin as an environmentally friendlier agent to enhance oil recovery // Fuel. 2022. Vol. 310. P. 122421. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122421.
20. Kamal M.S., Sultan A.S., Al-Mubaiyedh U.A., et al. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems // Polymer Reviews. 2015. Vol. 55, № 3. P. 491–530. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821
21. Gumus T., Sukru Demirci A., Mirik M., et al. Xanthan gum production of *Xanthomonas* spp. isolated from different plants // Food Science and Biotechnology. 2010. Vol. 19. P. 201–206. DOI: 10.1007/s10068-010-0027-9.
22. Niknezhad S.V., Asadollahi M.A., Zamani A., et al. Production of xanthan gum by free and immobilized cells of *Xanthomonas campestris* and *Xanthomonas pelargonii* // International Journal of Biological Macromolecules. 2016. Vol. 82. P. 751–756. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.10.065.
23. Ramezani A., Jafari M., Goodarzi T., et al. Lactose consuming strains of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* (Xcc) insight into the emergence of natural field resources for xanthan gum production // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2014. Vol. 30. P. 1511–1517. DOI: 10.1007/s11274-013-1571-2.
24. Lei S., Edmund T.F. Polysaccharides, microbial. In: Encyclopedia of Microbiology. 4th edition. Elsevier Inc., 2019. P. 660–678. DOI: 10.1016/b978-0-12-809633-8.13102-4.
25. Habibi H., Khosravi-Darani K. Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: A review // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2017. Vol. 10. P. 130–140. DOI: 10.1016/j.bcab.2017.02.013.
26. Letisse F., Lindley N.D., Roux G. Development of a phenomenological modeling approach for prediction of growth and xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* // Biotechnology Progress. 2003. Vol. 19, № 3. P. 822–827. DOI: 10.1021/bp0257168.
27. Soleymanpour Z., Nikzad M., Talebnia F., et al. Xanthan gum production from acid hydrolyzed broom-corn stem as a sole carbon source by *Xanthomonas campestris* // 3 Biotech. 2018. Vol. 8. P. 296. DOI: 10.1007/s13205-018-1322-z.

28. Ramos L.C., Jesus M.S., Pires P., et al. Optimization of xanthan gum production by demerara sugar using response surface methodology // Sustainability. 2023. Vol. 15, № 6. P. 5080. DOI: 10.3390/su15065080.
29. Vaishnav A., Upadhyay K., Koradiya M., et al. Valorisation of fruit waste for enhanced exopolysaccharide production by *Xanthomonas campestris* using statistical optimisation of medium and process // Food Bioscience. 2022. Vol. 46. P. 101608. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101608.
30. Davidson I.W. Production of polysaccharide by *Xanthomonas campestris* in continuous culture // FEMS Microbiology Letters. 1978. Vol. 3, № 6. P. 347–349.
31. Souw P., Demain A.L. Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B1459 // Applied and Environmental Microbiology. 1979. Vol. 37, № 6. P. 1186–1192.
32. Zhang J., Greasham R. Chemically defined media for commercial fermentations // Applied Microbiology and Biotechnology. 1999. Vol. 51. P. 407–421.
33. Garcá-Ochoa F., Santos V.E., Fritsch A.P. Nutritional study of *Xanthomonas campestris* in xanthan gum production by factorial design of experiments // Enzyme and Microbial Technology. 1992. Vol. 14, № 12. P. 991–996.
34. García-Ochoa F., Castro E.G., Santos V.E. Oxygen transfer and uptake rates during xanthan gum production // Enzyme and Microbial Technology. 2000. Vol. 27, № 9. P. 680–690.
35. Letisse F., Chevallereau P., Simon J.L. Kinetic analysis of growth and xanthan gum production with *Xanthomonas campestris* on sucrose, using sequentially consumed nitrogen sources // Applied Microbiology and Biotechnology. 2001. Vol. 55. P. 417–422.
36. Jeanes A., Rogovin P., Cadmus M.C., et al. Polysaccharide (xanthan) of *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459: procedures of culture maintenance and polysaccharide production purification and analysis. US Department of Agriculture, Peoria, Illinois: Agricultural Research Service, 1976. Vol. NC-51. P. 1–14. Доступно по: <https://archive.org/details/polysaccharidexa51jean>. Ссылка активна на 03.02.2025.
37. Cadmus M.C., Rogovin S.P., Burton K.A., et al. Colonial variation in *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459 and characterization of the polysaccharide from a variant strain // Canadian Journal of Microbiology. 1976. Vol. 22, № 7. P. 942–948.
38. Cadmus M.C., Knutson C.A., Lagoda A.A., et al. Synthetic media for production of quality xanthan gum in 20-liter fermenters // Biotechnology and Bioengineering. 1978. Vol. 20, № 7. P. 1003–1014.
39. Souw P., Demain A.L. Role of citrate in xanthan production by *Xanthomonas campestris* // Journal of Fermentation Technology. 1980. Vol. 58, № 5. P. 411–416. Доступно по: <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11076979>. Ссылка активна на 03.02.2025.
40. Funahashi H., Yoshida T., Taguchi H. Effect of glucose concentration on xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* // Journal of Fermentation Technology. 1987. Vol. 65, № 5. P. 603–606.
41. Slodki M.E., Cadmus M.C. Production of microbial polysaccharides // Advances in Applied Microbiology. 1978. Vol. 23. P. 19–54.
42. Smith I.H., Pace G.W. Recovery of microbial polysaccharides // Journal of Chemical Technology and Biotechnology. 1982. Vol. 32, № 1. P. 119–129.
43. Moraine R.A., Rogovin P. Kinetics of the xanthan fermentation // Biotechnology and Bioengineering. 1973. Vol. 15, № 2. P. 225–237.
44. Tait M.I., Sutherland I.W., Clarke-Sturman A.J. Effect of growth conditions on the production, composition and viscosity of *Xanthomonas campestris* exopolysaccharide // Microbiology. 1986. Vol. 132, № 6. P. 1483–1492.
45. Rogovin P., Albrecht W., Sohns V. Production of industrial-grade polysaccharide B-1459 // Biotechnology and Bioengineering. 1965. Vol. 7, № 1. P. 161–169.
46. Kennedy J.F., Jones P., Barker S.A., et al. Factors affecting microbial growth and polysaccharide production during the fermentation of *Xanthomonas campestris* cultures // Enzyme and Microbial Technology. 1982. Vol. 4, № 1. P. 39–43.
47. Shu C.H., Yang S.T. Effects of temperature on cell growth and xanthan production in batch cultures of *Xanthomonas campestris* // Biotechnology and Bioengineering. 1990. Vol. 3, № 5. P. 454–468.
48. Santos V.E. Producción de xantano. PhD thesis. Madrid, Spain: Universidad Complutense, 1993.

49. Garcia-Ochoa F., Santos V. E., Alcon A. Simulation of xanthan gum production by a chemically structured kinetic model // *Mathematics and Computers in Simulation*. 1996. Vol. 42, № 2-3. P. 187–195.
50. García-Ochoa F., Santos V.E., Alcon A. Xanthan gum production in a laboratory aerated stirred tank bioreactor // *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 1997. Vol. 11, № 2. P. 69–74. Доступно по: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2737433>. Ссылка активна на 03.02.2025.
51. Chisti Y. Pneumatically agitated bioreactors in industrial and environmental bioprocessing: hydrodynamics, hydraulics and transport phenomena // *Applied Mechanics Reviews*. 1998. Vol. 51, № 1. P. 33–112.
52. Nakayama T., Amachi T. *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis, and bioseparation*. New York, John Wiley, 1999. P. 1291–1305.
53. Shiram S., Venugopal P., Tungare A., et al. Optimization of xanthan gum fermentation utilizing food waste // *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2021. Vol. 6, № 5. P. 19–29. Доступно по: <https://academia.edu/download/66709392/GRDJEV061050008.pdf>. Ссылка активна на 03.02.2025.
54. Kadier A., Ilyas R.A., Huzaifah M.R.M., et al. Use of industrial wastes as sustainable nutrient sources for bacterial cellulose (BC) production: Mechanism, advances, and future perspectives // *Polymers*. 2021. Vol. 13, № 19. P. 3365.
55. Mohsin A., Zhang K., Hu J., et al. Optimized biosynthesis of xanthan via effective valorization of orange peels using response surface methodology: A kinetic model approach // *Carbohydrate Polymers*. 2018. Vol. 181. P. 793–800.
56. Demirci A.S., Palabiyik I., Apaydin D. et al. Xanthan gum biosynthesis using *Xanthomonas* isolates from wastebread: Process optimization and fermentation kinetics // *LWT*. 2019. Vol. 101. P. 40–47.
57. Li P., Zeng Y., Xie Y., et al. Effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of kitchen waste for xanthan production // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 223. P. 84–90.
58. Jesus M., Mata F., Batista R.A., et al. Corncob as carbon source in the production of xanthan gum in different strains *Xanthomonas* sp. // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 3. P. 2287.
59. Moosavi A., Karbassi A. Bioconversion of sugar-beet molasses into xanthan gum // *Journal of Food Processing and Preservation*. 2010. T. 34, № 2. C. 316–322.
60. Moravej R., Alavi S.M., Azin M., et al. Production and physicochemical characterization of xanthan gum by native lactose consuming isolates of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* // *Ukrainian Biochemical Journal*. 2020. Vol. 92, № 1. P. 92–102.
61. Bajić B., Rončević Z., Puškaš V., et al. White wine production effluents used for biotechnological production of xanthan // *Journal on Processing and Energy in agriculture*. 2015. Vol. 19, № 1. P. 52–55. Доступно по: <https://academia.edu/download/78321927/1821-44871501052B.pdf>. Ссылка активна на 03.02.2025.
62. Rončević Z., Zahović I., Danilović N., et al. Potential of different *Xanthomonas campestris* strains for xanthan biosynthesis on waste glycerol from biodiesel production // *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2020. Vol. 24, № 2. P. 62–66.
63. Wang Z., Wu J., Zhu L., et al. Characterization of xanthan gum produced from glycerol by a mutant strain *Xanthomonas campestris* CCTCC M2015714 // *Carbohydrate Polymers*. 2017. Vol. 157. P. 521–526.
64. Wang Z., Wu J., Zhu L., et al. Activation of glycerol metabolism in *Xanthomonas campestris* by adaptive evolution to produce a high-transparency and low-viscosity xanthan gum from glycerol // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 211. P. 390–397.
65. García-Ochoa F., Casas J.A., Mohedano A.F. Xanthan precipitation from solutions and fermentation broths // *Separation Science and Technology*. 1993. Vol. 28, № 6. P. 1303–1313.
66. Kennedy J.F., Bradshaw I.J. Production, properties and applications of xanthan // *Progress in Industrial Microbiology*. 1984. Vol. 19. P. 319–371. Доступно по: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9732503>. Ссылка активна на 03.02.2025.
67. Galindo E., Albitzer V. High-yield recovery of xanthan by precipitation with isopropyl alcohol in a stirred tank // *Biotechnology Progress*. 1996. Vol. 12, № 4. P. 540–547.

68. García-Ochoa F., Casas J. A. Apparent yield stress in xanthan gum solution at low concentration // The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. 1994. Vol. 53, № 3. P. B41–B46.
69. Lo Y.M., Yang S.T., Min D.B. Effects of yeast extract and glucose on xanthan production and cells growth in batch culture of *Xanthomonas campestris* // Applied Microbiology and Biotechnology. 1997. Vol. 47. P. 689–694.
70. Lo Y.M., Yang S.T., Min D.B. Ultrafiltration of xanthan gum fermentation broth: Process and economic analyses // Journal of Food Engineering. 1997. Vol. 31, № 2. P. 219–236.
71. Ватолин А.К., Грошев В.М., Дерябин В.В., Офицеров Е.Н., Хусаинов Н.И. Способ получения ксантанового загустителя «Сараксан» или «Сараксан-Т». Патент РФ № 2252033. 20.05.2005. Бюл. № 14. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2252033&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
72. Иванова М.А., Герман Л.С., Сенаторова В.Н., Вакар Л.Л., Нестеров В.А. Способ получения ксантана. Патент РФ № 2559553. 10.08.2015. Бюл. № 22. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2559553&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
73. Шилова А.В. Штамм бактерии *Xanthomonas campestris* – продуцент ксантана. Патент РФ № 2639557. 21.12.2017. Бюл. № 36. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2639557&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
74. Шилова А.В. Способ получения полисахаридной добавки на основе пищевой ксантановой камеди. Патент РФ № 2748947. 02.06.2021. Бюл. № 16. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2748947 &TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
75. Ревин В.В., Лясыкина Е.В. Штамм бактерии *Xanthomonas theicola* – продуцент ксантана. Патент РФ № 2714638. 18.02.2020. Бюл. № 5. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2714638&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
76. Revin V.V., Liyaskina E.V., Pokidko B.V., et al. Characteristics of the new xanthan-producing strain *Xanthomonas campestris* M 28: study of the genome, cultivation conditions, and physicochemical and rheological properties of the polysaccharide // Applied Biochemistry and Microbiology. 2021. Vol. 57, № 3. P. 356–365.
77. Саргин Б.В., Батарагин В.М., Бочкарев А.А. Штамм бактерий *Xanthomonas fuscans* – продуцент ксантановой камеди. Патент РФ № 2744107. 02.03.2021. Бюл. № 7. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2744107&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
78. Саргин Б.В., Батарагин В.М., Бочкарев А.А. Способ получения ксантановой камеди. Патент РФ № 2746229. 09.04.2021, Бюл. № 10. Доступно по: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2746229&TypeFile=html. Ссылка активна на 11.06.2025.
79. Алиев С. Кубанские ученые из вторсырья научились производить редкий загуститель. Доступно по: <https://kubantv.ru/obshhestvo/kubanskie-ucenye-iz-vtorsyrya-naucilis-proizvodit-redkii-zagustitel>. Ссылка активна на 27.01.2025.
80. Asase R., Serevovich D., Selezneva I., et al. Xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* B6720: Fermentation process and application in fermented soymilk // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 121.
81. Xinzhenq Q., Lei F., Xinping Y., Xinzhenq F.Q. Fermentation technique for producing xanthan gum. China patent CN № 1539987A. 27.10.2004. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN1539987A/en?q=CN1539987A>. Accessed: 11.06.2025.
82. Hamilton Hamilton M.A., Dawkins G.S., Mellowes W.A. Xanthan gum production from sugarcane fluids. United States patent US № 2009232938A1. 17.09.2009. Available at: <https://patents.google.com/patent/US2009232938A1/en?q=US2009232938A1>. Accessed: 11.06.2025.
83. Gleice G., Pacheco V., Vasconcellos L.B., Janice I.D. Use of yeast biomass as a substrate, supplemented or not, for the production of biopolymers like xanthan gum. British Patent BR

- № PI0803131A2. 19.01.2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/BRPI0803131A2/en?q=BR+PI0803131A2>. Accessed: 11.06.2025.
84. Li M., Chen J., Du J., Ren Y., Wang X., Shi Y., Si S., Zhu Y. Process for producing xanthan gum from boiler concentrated water from the power plant through fermentation. China patent CN № 103710408A. 09.04.2014. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN103710408A/en?q=CN103710408A>. Accessed: 11.06.2025.
85. Dong X., Zhang Y., Wang W., Zhang Y., Han H., Liu Y. Pigment-free *Xanthomonas* and application of pigment-free *Xanthomonas* in fermentation production of pigment-free xanthan gum. China patent CN № 114015612. 08.02.2022. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN114015612A/en?q=CN114015612>. Accessed: 11.06.2025.
86. Bauer A.K., Khosrovi B. Process of using *Xanthomonas campestris* NRRL B-12075 and NRRL B-12074 for making heteropolysaccharide. United States patent US № 4400467A. 23.08.1983. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4400467A/en?q=US4400467A>. Accessed: 11.06.2025.
87. Sworn G., Keravid E., Chevallereau P., Fayos J. Improved xanthan gum. Patent WO № 2010112499A1. 07.10.2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2010112499A1/en?q=WO2010112499A1>. Accessed: 11.06.2025.
88. Weisrock W.P. Method for improving xanthan yield. United States patent US № 4301247A. 17.11.1981. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4301247A/en?q=US4301247A>. Accessed: 11.06.2025.
89. Murofushi K., Nagura S. Process for production of saline-solution soluble xanthan gum. United States patent US № 6194564B1. 27.02.2001. Available at: <https://patents.google.com/patent/US6194564B1/en?q=US6194564B1>. Accessed: 11.06.2025.
90. Zhang Y., Zhang G., Zhang C., et al. Method for producing xanthan gum by using waste molasses or waste glucose mother liquor as raw material. China patent CN № 101240309A. 06.07.2011. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN101240309A/en?q=CN101240309A>. Accessed: 11.06.2025.
91. Barcelos M.C.S., Vespermann K.A.C., Pelissari F.M., et al. Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019. Vol. 60, № 9. P. 1475–1495.
92. Petri D.F. Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications // *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132, № 23. P. 42035.
93. Кудряшова О.А. Функционально-технологические свойства гидроколлоидов и их применение при производстве колбас // *Мясные технологии*. 2009. Т. 2. С. 12–17. Доступно по: <https://meat-branch.com/publ/view/134.html>. Ссылка активна на 03.02.2025.
94. Rather S.A., Masoodi F.A., Akhter R., et al. Xanthan gum as a fat replacer in goshtaba – a traditional meat product of India: effects on quality and oxidative stability // *Journal of food science and technology*. 2015. Vol. 52. P. 8104–8112.
95. Rather J.A., Akhter N., Rather S.A., et al. Effect of xanthan gum treatment on the shelf-life enhancement of retorted meatballs (Goshtaba): A traditional meat product of India // *Measurement: Food*. 2024. Vol. 13. P. 100127.
96. Hui Y.H., Corke H., De Leyn I., et al. *Bakery products: science and technology*. USA, Iowa, Ames: Wiley-Blackwell, 2008. 586 p.
97. Zheng M., Chen J., Tan K.B., et al. Development of hydroxypropyl methylcellulose film with xanthan gum and its application as an excellent food packaging bio-material in enhancing the shelf life of banana // *Food Chemistry*. 2022. Vol. 374. P. 131794.
98. Rukmanikrishnan B., Ismail F.R.M., Manoharan R.K., et al. Blends of gellan gum/xanthan gum/zinc oxide based nanocomposites for packaging application: rheological and antimicrobial properties // *International journal of biological macromolecules*. 2020. Vol. 148. P. 1182–1189.
99. Tabassum Z., Girdhar M., Kumar A., et al. ZnO nanoparticles-reinforced chitosan–xanthan gum blend novel film with enhanced properties and degradability for application in food packaging // *ACS omega*. 2023. Vol. 8, № 34. P. 31318–31332.
100. Tang S., Gong Z., Wang Z., et al. Multifunctional hydrogels for wound dressings using xanthan gum and polyacrylamide // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 217. P. 944–955.

101. Singh S., Nwabor O.F., Sukri D.M., et al. Poly (vinyl alcohol) copolymerized with xanthan gum/hypromellose/sodium carboxymethyl cellulose dermal dressings functionalized with biogenic nanostructured materials for antibacterial and wound healing application // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 216. P. 235–250.
102. Gutierrez-Reyes J.E., Caldera-Villalobos M., Claudio-Rizo J.A., et al. Smart collagen/xanthan gum-based hydrogels with antibacterial effect, drug release capacity and excellent performance in vitro bioactivity for wound healing application // *Biomedical Materials*. 2023. Vol. 18, № 3. P. 035011.
103. Unalan I., Schrufer S., Schubert D.W., et al. 3D-printed multifunctional hydrogels with phytotherapeutic properties: Development of essential oil-incorporated ALG-XAN hydrogels for wound healing applications // *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2023. Vol. 9, № 7. P. 4149–4167.
104. Liang Y., Chitrakar B., Liu Z., et al. Preparation and characterization of 3D-printed antibacterial hydrogel with benzyl isothiocyanate // *International Journal of Bioprinting*. 2023. Vol. 9, № 2. P. 671.
105. Alves A., Miguel S.P., Araujo A.R.T.S., et al. Xanthan gum-konjac glucomannan blend hydrogel for wound healing // *Polymers*. 2020. Vol. 12, № 1. P. 99.
106. Zuliani C.C., Damas I.I., Andrade K.C., et al. Chondrogenesis of human amniotic fluid stem cells in Chitosan-Xanthan scaffold for cartilage tissue engineering // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11, № 1. P. 3063.
107. Bueno V.B., Bentini R., Catalani L.H., et al. Synthesis and characterization of xanthan–hydroxyapatite nanocomposites for cellular uptake // *Materials Science and Engineering: C*. 2014. Vol. 37. P. 195–203.
108. Barbosa R.M., da Rocha D.N., Bombaldi de Souza R.F., et al. Cell-friendly chitosan-xanthan gum membranes incorporating hydroxyapatite designed for periodontal tissue regeneration // *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 705.
109. Souza A.P.C., Neves J.G., Navarro da Rocha D., et al. Chitosan/Xanthan membrane containing hydroxyapatite/Graphene oxide nanocomposite for guided bone regeneration // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022. Vol. 136. P. 105464.
110. Souza A.P., Neves J.G., Navarro da Rocha D., et al. Chitosan/Xanthan/ Hydroxyapatite-graphene oxide porous scaffold associated with mesenchymal stem cells for dentin-pulp complex regeneration // *Journal of Biomaterials Applications*. 2023. Vol. 37, № 9. P. 1605–1616.
111. Singh A., Muduli C., Senanayak S.P., et al. Graphite nanopowder incorporated xanthan gum scaffold for effective bone tissue regeneration purposes with improved biomineralization // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 234. P. 123724.
112. Piola B., Sabbatini M., Gino S., et al. 3D Bioprinting of gelatin–xanthan gum composite hydrogels for growth of human skin cells // *International Journal of Molecular Sciences*. 2022. Vol. 23, № 1. P. 539.
113. Anwar M., Pervaiz F., Shoukat H., et al. Formulation and evaluation of interpenetrating network of xanthan gum and polyvinylpyrrolidone as a hydrophilic matrix for controlled drug delivery system // *Polymer Bulletin*. 2021. Vol. 78. P. 59–80.
114. Jadav M., Pooja D., Adams D.J., et al. Advances in xanthan gum-based systems for the delivery of therapeutic agents // *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, № 2. P. 402.
115. Kala S., Gurudiwan P., Juyal D. Formulation and evaluation of besifloxacin loaded in situ gel for ophthalmic delivery // *Pharmaceutical and Biosciences Journal*. 2018. Vol. 6. P. 36–40.
116. Garg R., Kumar V., Sharma V. Design and characterization of flucytosine loaded bioadhesive in situ ophthalmic gel for improved bioavailability // *Pharmaceutical and Biosciences Journal*. 2019. Vol. 7. P. 17–20.
117. Malik N.S., Ahmad M., Minhas M.U., et al. Chitosan/xanthan gum-based hydrogels as potential carrier for an antiviral drug: fabrication, characterization, and safety evaluation // *Frontiers in chemistry*. 2020. Vol. 8. P. 50.
118. Trombino S., Serini S., Cassano R., et al. Xanthan gum-based materials for omega-3 PUFA delivery: Preparation, characterization and antineoplastic activity evaluation // *Carbohydrate Polymers*. 2019. Vol. 208. P. 431–440.

119. Singh S., Kotla N.G., Tomar S., et al. A nanomedicine-promising approach to provide an appropriate colon-targeted drug delivery system for 5-fluorouracil // *International Journal of Nanomedicine*. 2015. Vol. 10. P. 7175–7182.
120. Furtado I.F.S.P.C., Sydney E.B., Rodrigues S.A., et al. Xanthan gum: applications, challenges, and advantages of this asset of biotechnological origin // *Biotechnology Research and Innovation Journal*. 2022. Vol. 6, № 1. P. e202204.
121. Khattab H., Gawish A.A., Hamdy A., et al. Assessment of a novel Xanthan gum-based composite for oil recovery improvement at reservoir conditions; assisted with simulation and economic studies // *Journal of Polymers and the Environment*. 2024. Vol. 32. P. 3363–3391.
122. Olabode O., Akinsanya O., Daramola O., et al. Effect of salt concentration on oil recovery during polymer flooding: simulation studies on xanthan gum and gum arabic // *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 19. P. 4013.
123. Abu Elella M.H., Goda E.S., Gab-Allah M.A., et al. Xanthan gum-derived materials for applications in environment and eco-friendly materials: A review // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 104702.
124. Dzionek A., Wojcieszynska D., Guzik U. Use of xanthan gum for whole cell immobilization and its impact in bioremediation-a review // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 351. P. 126918.
125. Sorze A., Valentini F., Dorigato A., et al. Development of a xanthan gum based superabsorbent and water retaining composites for agricultural and forestry applications // *Molecules*. 2023. Vol. 28, № 4. P. 1952.
126. Kumar P., Kumar B., Gihar S., et al. Review on emerging trends and challenges in the modification of xanthan gum for various applications // *Carbohydrate Research*. 2024. Vol. 538. P. 109070.

References

1. Pu W, Shen C, Wei B, et al. A comprehensive review of polysaccharide biopolymers for enhanced oil recovery (EOR) from flask to field. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2018;61:1-11. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.12.034. EDN: VEBPVC.
2. Margaritis A, Zajic JE. Biotechnology review: mixing mass transfer and scale-up of polysaccharide fermentations. *Biotechnology and Bioengineering*. 1978;20:939-1001. DOI: 10.1002/bit.260200702.
3. Netrusov AI, Liyaskina EV, Kurgaeva IV, et al. Exopolysaccharides producing bacteria: a review. *Microorganisms*. 2023;11:1541. DOI: 10.3390/microorganisms11061541.
4. Ibrahim HAH, Abou Elhassayeb HE, El-Sayed WMM Potential functions and applications of diverse microbial exopolysaccharides in marine environments. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 2022;20(1):151. DOI: 10.1186/s43141-022-00432-2.
5. Analiz razmera i doli rynka ksantanovoy kamedy – tendentsii rosta i prognozy (2024–2029 gg.) Available at: <https://mordorintelligence.com/ru/industry-reports/xanthan-gum-market>. Accessed: 27.01.2025.
6. Berninger T, Dietz N, González López Ó. Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics. *Microbial Biotechnology*. 2021;14(5):1881-1896. DOI: 10.1111/1751-7915.13867.
7. Chang I, Lee M, Tran ATP, et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *Transportation Geotechnics*. 2020;24:100385. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100385
8. Becker A, Katzen F, Pühler A, et al. Xanthan gum biosynthesis and application: a biochemical/genetic perspective. Review. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1998;50(2):145-152. DOI: 10.1007/s002530051269.
9. García-Ochoa F, Santos VE, Casas JA, et al. Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*. 2000;18(7):549-579. DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00050-1.
10. Rosalam S, England R. Review of xanthan gum production from unmodified starches by *Xanthomonas campestris* sp. *Enzyme and Microbial Technology*. 2006;39(2):197-207. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2005.10.019.
11. Barua R, Alam MJ, Salim M, et al. Small scale production and characterization of xanthan gum synthesized by local isolates of *Xanthomonas campestris*. *Indian Journal of Experimental Biology*.

- 2016;54(2):151-155. Available at: <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/33746>. Accessed: 27.01.2025.
12. Kumar A, Rao KM, Han SS. Application of xanthan gum as polysaccharide in tissue engineering: A review. *Carbohydrate Polymers*. 2018;80:128-144. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.10.009.
 13. Dey R, Chatterji BP. Sources and methods of manufacturing xanthan by fermentation of various carbon sources. *Biotechnology Progress*. 2023;39(6):e3379. DOI: 10.1002/btpr.3379.
 14. Revin VV, Liyaskina EV, Parchaykina MV, et al. Production of bacterial exopolysaccharides: xanthan and bacterial cellulose. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(19):14608. DOI: 10.3390/ijms241914608.
 15. Efremenko E, Senko O, Maslova O, et al. Biocatalysts in synthesis of microbial polysaccharides: Properties and development trends. *Catalysts*. 2022;12(11):1377. DOI: 10.3390/catal12111377.
 16. V RF zamestyat import vazhneyshego komponenta dlya neftyanoy i pishchevoy promyshlennosti. Informagentstvo «Devon». Available at: https://iadevon.ru/news/oil/v_rf_zamestyat_import_vazhneyshego_komponenta_dlya_neftyanoy_i_pishchevoy_promishlennosti-13174/. Accessed: 03.02.2025.
 17. Analysis of the Xanthan Gum Market in Russia. Analytical Report DISCOVERY RESEARCH GROUP. Available at: https://drgroup.ru/components/com_jshopping/files/demo_products/Demo_Kamed.PDF. (Accessed: 02.02.2025).
 18. Magadova LA, Poteshkina KA, Davletshina LF, et al. Xanthan as a Universal Polymer for Oil and Gas Production and a Product of Biotechnology. *Oil and Gas Business*. 2023;5:55-82. (in Russ). DOI: 10.17122/ogbus-2023-5-55-82.
 19. de Souza ER, Rodrigues PD, Sampaio IC, et al. Xanthan gum produced by *Xanthomonas campestris* using produced water and crude glycerin as an environmentally friendlier agent to enhance oil recovery. *Fuel*. 2022;310:122421. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122421.
 20. Kamal MS, Sultan AS, Al-Mubaiyedh UA, et al. Review on polymer flooding: rheology, adsorption, stability, and field applications of various polymer systems. *Polymer Reviews*. 2015;55(3):491-530. DOI: 10.1080/15583724.2014.982821.
 21. Gumus T, Sukru Demirci A, Mirik M, et al. Xanthan gum production of *Xanthomonas* spp. isolated from different plants. *Food Science and Biotechnology*. 2010;19:201-206. DOI: 10.1007/s10068-010-0027-9.
 22. Niknezhad SV, Asadollahi MA, Zamani A, et al. Production of xanthan gum by free and immobilized cells of *Xanthomonas campestris* and *Xanthomonas pelargonii*. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2016;82:751-756. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.10.065.
 23. Ramezani A, Jafari M, Goodarzi T, et al. Lactose consuming strains of *Xanthomonas citri* subsp. *citri* (Xcc) insight into the emergence of natural field resources for xanthan gum production. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2014;30:1511-1517. DOI: 10.1007/s11274-013-1571-2.
 24. Lei S, Edmund TF. Polysaccharides, microbial. In: *Encyclopedia of Microbiology*. 4th edition. Elsevier Inc.; 2019. P. 660-678. DOI: 10.1016/b978-0-12-809633-8.13102-4.
 25. Habibi H, Khosravi-Darani K. Effective variables on production and structure of xanthan gum and its food applications: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2017;10:130-140. DOI: 10.1016/j.bcab.2017.02.013.
 26. Letisse F, Lindley ND, Roux G. Development of a phenomenological modeling approach for prediction of growth and xanthan gum production using *Xanthomonas campestris*. *Biotechnology Progress*. 2003;19(3):822-827. DOI: 10.1021/bp0257168.
 27. Soleymanpour Z, Nikzad M, Talebnia F, et al. Xanthan gum production from acid hydrolyzed broom-corn stem as a sole carbon source by *Xanthomonas campestris*. *3 Biotech*. 2018;8:296. DOI: 10.1007/s13205-018-1322-z.
 28. Ramos LC, Jesus MS, Pires P, et al. Optimization of xanthan gum production by demerara sugar using response surface methodology. *Sustainability*. 2023;15(6):5080. DOI: 10.3390/su15065080.
 29. Vaishnav A, Upadhyay K, Koradiya M, et al. Valorisation of fruit waste for enhanced exopolysaccharide production by *Xanthomonas campestris* using statistical optimisation of medium and process. *Food Bioscience*. 2022;46:101608. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101608.
 30. Davidson IW. Production of polysaccharide by *Xanthomonas campestris* in continuous culture. *FEMS Microbiology Letters*. 1978;3(6):347-349. DOI: 10.1111/j.1574-6968.1978.tb01969.x

31. Souw P, Demain AL. Nutritional studies on xanthan production by *Xanthomonas campestris* NRRL B1459. *Applied and Environmental Microbiology*. 1979;37(6):1186-1192. DOI: 10.1128/aem.37.6.1186-1192.1979
32. Zhang J, Greasham R. Chemically defined media for commercial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1999;51:407-421. DOI: 10.1007/s002530051411
33. Garcá-Ochoa F, Santos VE, Fritsch AP. Nutritional study of *Xanthomonas campestris* in xanthan gum production by factorial design of experiments. *Enzyme and Microbial Technology*. 1992;14(12):991-996. DOI: 10.1016/0141-0229(92)90083-Z
34. García-Ochoa F, Castro EG, Santos VE. Oxygen transfer and uptake rates during xanthan gum production. *Enzyme and Microbial Technology*. 2000;27(9):680-690. DOI: 10.1016/S0141-0229(00)00272-6.
35. Létisse F, Chevallereau P, Simon JL. Kinetic analysis of growth and xanthan gum production with *Xanthomonas campestris* on sucrose, using sequentially consumed nitrogen sources. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2001;55:417-422. DOI: 10.1007/s002530000580.
36. Jeanes A, Rogovin P, Cadmus MC, et al. Polysaccharide (xanthan) of *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459: procedures of culture maintenance and polysaccharide production purification and analysis. US Department of Agriculture, Peoria, Illinois: Agricultural Research Service, 1976;NC-51:1-14. Available at: <https://archive.org/details/polysaccharidexa51jean>. Accessed: 03.02.2025.
37. Cadmus MC, Rogovin SP, Burton KA, et al. Colonial variation in *Xanthomonas campestris* NRRL B-1459 and characterization of the polysaccharide from a variant strain. *Canadian Journal of Microbiology*. 1976;22(7):942-948. DOI: 10.1139/m76-136.
38. Cadmus MC, Knutson CA, Lagoda AA, et al. Synthetic media for production of quality xanthan gum in 20-liter fermenters. *Biotechnology and Bioengineering*. 1978;20(7):1003-1014. DOI: 10.1002/bit.260200703.
39. Souw P, Demain AL. Role of citrate in xanthan production by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Fermentation Technology*. 1980;58(5):411-416. Available at: <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/11076979>. Accessed: 03.02.2025.
40. Funahashi H, Yoshida T, Taguchi H. Effect of glucose concentration on xanthan gum production by *Xanthomonas campestris*. *Journal of Fermentation Technology*. 1987;65(5):603-606. DOI: 10.1016/0385-6380(87)90124-5.
41. Slodki ME, Cadmus MC. Production of microbial polysaccharides. *Advances in Applied Microbiology*. 1978;23:19-54. DOI: 10.1016/S0065-2164(08)70064-9.
42. Smith IH, Pace GW. Recovery of microbial polysaccharides. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 1982;32(1):119-129. DOI: 10.1002/jctb.5030320116.
43. Moraine RA, Rogovin P. Kinetics of the xanthan fermentation. *Biotechnology and Bioengineering*. 1973;15(2):225-237. DOI: 10.1002/bit.260150202.
44. Tait MI, Sutherland IW, Clarke-Sturman AJ. Effect of growth conditions on the production, composition and viscosity of *Xanthomonas campestris* exopolysaccharide. *Microbiology*. 1986;132(6):1483-1492. DOI: 10.1099/00221287-132-6-1483.
45. Rogovin P, Albrecht W, Sohns V. Production of industrial-grade polysaccharide B-1459. *Biotechnology and Bioengineering*. 1965;7(1):161-169. DOI: 10.1002/bit.260070125.
46. Kennedy JF, Jones P, Barker SA, et al. Factors affecting microbial growth and polysaccharide production during the fermentation of *Xanthomonas campestris* cultures. *Enzyme and Microbial Technology*. 1982;4(1):39-43. DOI: 10.1016/0141-0229(82)90009-6.
47. Shu CH, Yang ST. Effects of temperature on cell growth and xanthan production in batch cultures of *Xanthomonas campestris*. *Biotechnology and Bioengineering*. 1990;3(5):454-468. DOI: 10.1002/bit.260350503.
48. Santos VE. Producción de xantano. PhD thesis. Madrid, Spain: Universidad Complutense; 1993.
49. García-Ochoa F, Santos V E, Alcon A. Simulation of xanthan gum production by a chemically structured kinetic model. *Mathematics and Computers in Simulation*. 1996;42(2-3):187-195. DOI: 10.1016/0378-4754(95)00113-1.
50. García-Ochoa F, Santos VE, Alcon A. Xanthan gum production in a laboratory aerated stirred tank bioreactor. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. 1997;11(2):69-74. Available at: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=2737433>. Accessed: 03.02.2025.

51. Chisti Y. Pneumatically agitated bioreactors in industrial and environmental bioprocessing: hydrodynamics, hydraulics and transport phenomena. *Applied Mechanics Reviews*. 1998;51(1):33-112. DOI: 10.1115/1.3098989.
52. Nakayama T, Amachi T. *Encyclopedia of bioprocess technology: fermentation, biocatalysis, and bioseparation*. New York, John Wiley; 1999. DOI: 10.1002/0471250589.
53. Shiram S, Venugopal P, Tungare A, et al. Optimization of xanthan gum fermentation utilizing food waste. *Global Research and Development Journal for Engineering*. 2021;6(5):19-29. Available at: <https://academia.edu/download/66709392/GRDJEV06I050008.pdf>. Accessed: 03.02.2025.
54. Kadier A, Ilyas RA, Huzafah MRM, et al. Use of industrial wastes as sustainable nutrient sources for bacterial cellulose (BC) production: Mechanism, advances, and future perspectives. *Polymers*. 2021;13(19):3365. DOI: 10.3390/polym13193365.
55. Mohsin A, Zhang K, Hu J, et al. Optimized biosynthesis of xanthan via effective valorization of orange peels using response surface methodology: A kinetic model approach. *Carbohydrate Polymers*. 2018;181:793-800. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.11.076.
56. Demirci AS, Palabiyik I, Apaydin D. et al. Xanthan gum biosynthesis using *Xanthomonas* isolates from wastebread: Process optimization and fermentation kinetics. *LWT*. 2019;101:40-47. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.11.018.
57. Li P, Zeng Y, Xie Y, et al. Effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of kitchen waste for xanthan production. *Bioresource Technology*. 2017;223:84-90. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.10.035.
58. Jesus M, Mata F, Batista RA, et al. Corn cob as carbon source in the production of xanthan gum in different strains *Xanthomonas* sp. *Sustainability*. 2023;15(3):2287. DOI: 10.3390/su15032287.
59. Moosavi A, Karbassi A. Bioconversion of sugar-beet molasses into xanthan gum. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2010;34(2):316-322. DOI: 10.1111/j.1745-4549.2009.00376.x.
60. Moravej R, Alavi SM, Azin M, et al. Production and physicochemical characterization of xanthan gum by native lactose consuming isolates of *Xanthomonas citri* subsp. *citri*. *Ukrainian Biochemical Journal*. 2020;92(1):92-102. DOI: 10.15407/ubj92.01.092.
61. Bajić B, Rončević Z, Puškaš V, et al. White wine production effluents used for biotechnological production of xanthan. *Journal on Processing and Energy in agriculture*. 2015;19(1):52-55. Available at: <https://academia.edu/download/78321927/1821-44871501052B.pdf>. Accessed: 03.02.2025.
62. Rončević Z, Zahović I, Danilović N, et al. Potential of different *Xanthomonas campestris* strains for xanthan biosynthesis on waste glycerol from biodiesel production. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 2020;24(2):62-66. DOI: 10.5937/jpea24-25506.
63. Wang Z, Wu J, Zhu L, et al. Characterization of xanthan gum produced from glycerol by a mutant strain *Xanthomonas campestris* CCTCC M2015714. *Carbohydrate Polymers*. 2017;157:521-526. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.10.033.
64. Wang Z, Wu J, Zhu L, et al. Activation of glycerol metabolism in *Xanthomonas campestris* by adaptive evolution to produce a high-transparency and low-viscosity xanthan gum from glycerol. *Bioresource Technology*. 2016;211:390-397. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.03.096.
65. García-Ochoa F, Casas JA, Mohedano AF. Xanthan precipitation from solutions and fermentation broths. *Separation Science and Technology*. 1993;28(6):1303-1313. DOI: 10.1080/01496399308018038.
66. Kennedy JF, Bradshaw IJ. Production, properties and applications of xanthan. *Progress in Industrial Microbiology*. 1984;19:319-371. Available at: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=9732503>. Accessed: 03.02.2025.
67. Galindo E, Albiter V. High-yield recovery of xanthan by precipitation with isopropyl alcohol in a stirred tank. *Biotechnology Progress*. 1996;12(4):540-547. DOI: 10.1021/bp9600445.
68. García-Ochoa F, Casas J A. Apparent yield stress in xanthan gum solution at low concentration. *The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal*. 1994;53(3):B41-B46. DOI: 10.1016/0923-0467(93)06043-P.
69. Lo YM, Yang ST, Min DB. Effects of yeast extract and glucose on xanthan production and cells growth in batch culture of *Xanthomonas campestris*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1997;47:689-694. DOI: 10.1007/s002530050996.
70. Lo YM, Yang ST, Min DB. Ultrafiltration of xanthan gum fermentation broth: Process and economic analyses. *Journal of Food Engineering*. 1997;31(2):219-236. DOI: 10.1016/S0260-8774(96)00068-4.

71. Vatolin AK, Groshev VM, Deryabin VV, Ofitserov EN, Khusainov NI. Sposob polucheniya ksantanovogo zagustitelya "Saraksan" ili "Saraksan-T". Patent RUS № 2252033. 20.05.2005. Byul. № 14. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2252033&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025. (In Russ.).
72. Ivanova MA, German LS, Senatorova VN, Vakar LL, Nesterov VA. Sposob polucheniya ksantana. Patent RUS № 2559553. 10.08.2015. Byul. № 22. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2559553&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
73. Shilova AV. Shtamm bakterii *Xanthomonas campestris* – produtsent ksantana. Patent RUS № 2639557. 21.12.2017. Byul. № 36. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2639557&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
74. Shilova AV. Sposob polucheniya polisakharidnoy dobavki na osnove pishchevoy ksantanovoy kamedii. Patent RUS № 2748947. 02.06.2021. Byul. № 16. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2748947&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
75. Revin VV, Liyas'kina EV. Shtamm bakterii *Xanthomonas theicola* – produtsent ksantana. Patent RUS № 2714638. 18.02.2020. Byul. № 5. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2714638&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
76. Revin VV, Liyaskina EV, Pokidko BV, et al. Characteristics of the new xanthan-producing strain *Xanthomonas campestris* M 28: study of the genome, cultivation conditions, and physicochemical and rheological properties of the polysaccharide. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2021;57(3):356-365. DOI: 10.1134/S0003683821030108.
77. Sargin BV, Bataragin VM, Bochkarev AA. Shtamm bakteriy *Xanthomonas fuscans* – produtsent ksantanovoy kamedii. Patent RUS № 2744107. 02.03.2021. Byul. № 7. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2744107&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
78. Sargin BV, Bataragin VM, Bochkarev AA. Sposob polucheniya ksantanovoy kamedii. Patent RUS № 2746229. 09.04.2021. Byul. № 10. Available at: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2746229&TypeFile=html. Accessed: 11.06.2025.
79. Aliyev S. Kubanskiye uchenyye iz vtorsyr'ya nauchilis' proizvodit' redkiy zagustitel'. Available at: <https://kubantv.ru/obshhestvo/kubanskie-ucenye-iz-vtorsyrya-naucilis-proizvodit-redkii-zagustitel>. Accessed: 27.01.2025.
80. Asase R, Seredovich D, Selezneva I, et al. Xanthan gum production using *Xanthomonas campestris* B6720: Fermentation process and application in fermented soymilk. *BIO Web of Conferences*. 2024;121. DOI: 10.1051/bioconf/202412101005.
81. Xinzhenq Q, Lei F, Xinpinq Y, Xinzhenq FQ. Fermentation technique for producing xanthan gum. China patent CN № 1539987A. 27.10.2004. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN1539987A/en?q=CN1539987A>. Accessed: 11.06.2025.
82. Hamilton MA, Dawkins GS, Mellowes WA. Xanthan gum production from sugarcane fluids. United States patent US № 2009232938A1. 17.09.2009. Available at: <https://patents.google.com/patent/US2009232938A1/en?q=US2009232938A1>. Accessed: 11.06.2025.
83. Gleice G, Pacheco V, Vasconcellos LB, Janice ID. Use of yeast biomass as a substrate, supplemented or not, for the production of biopolymers like xanthan gum. British Patent BR № PI0803131A2. 19.01.2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/BRPI0803131A2/en?q=BR+PI0803131A2>. Accessed: 11.06.2025.
84. Li M, Chen J, Du J, Ren Y, Wang X, Shi Y, Si S, Zhu Y. Process for producing xanthan gum from boiler concentrated water from the power plant through fermentation. China patent CN № 103710408A. 09.04.2014. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN103710408A/en?q=CN103710408A>. Accessed: 11.06.2025.
85. Dong X, Zhang Y, Wang W, Zhang Y, Han H, Liu Y. Pigment-free *Xanthomonas* and application of pigment-free *Xanthomonas* in fermentation production of pigment-free xanthan gum. China patent CN № 114015612. 08.02.2022. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN114015612A/en?q=CN114015612>. Accessed: 11.06.2025.

86. Bauer AK, Khosrovi B. Process of using *Xanthomonas campestris* NRRL B-12075 and NRRL B-12074 for making heteropolysaccharide. United States patent US № 4400467A. 23.08.1983. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4400467A/en?q=US4400467A>. Accessed: 11.06.2025.
87. Sworn G, Kerdauid E, Chevallereau P, Fayos J. Improved xanthan gum. Patent WO № 2010112499A1. 07.10.2010. Available at: <https://patents.google.com/patent/WO2010112499A1/en?q=WO2010112499A1>. Accessed: 11.06.2025.
88. Weisrock WP. Method for improving xanthan yield. United States patent US № 4301247A. 17.11.1981. Available at: <https://patents.google.com/patent/US4301247A/en?q=US4301247A>. Accessed: 11.06.2025.
89. Murofushi K, Nagura S. Process for production of saline-solution soluble xanthan gum. United States patent US № 6194564B1. 27.02.2001. Available at: <https://patents.google.com/patent/US6194564B1/en?q=US6194564B1>. Accessed: 11.06.2025.
90. Zhang Y, Zhang G, Zhang C, et al. Method for producing xanthan gum by using waste molasses or waste glucose mother liquor as raw material. China patent CN № 101240309A. 06.07.2011. Available at: <https://patents.google.com/patent/CN101240309A/en?q=CN101240309A>. Accessed: 11.06.2025.
91. Barcelos MCS, Vespermann KAC, Pelissari FM, et al. Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019;60(9):1475-1495. DOI: 10.1080/10408398.2019.1575791.
92. Petri DF. Xanthan gum: A versatile biopolymer for biomedical and technological applications. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015;132(23):42035. DOI: 10.1002/app.42035.
93. Kudryashova O.A. Funktsional'no-tekhnologicheskkiye svoystva gidrokolloidov i ikh primeneniye pri proizvodstve kolbas. *Meat Technology magazine*. 2009;2:12-17. Available at: <https://meat-branch.com/publ/view/134.html>. Ссылка активна на 27.01.2025.
94. Rather SA, Masoodi FA, Akhter R, et al. Xanthan gum as a fat replacer in goshtaba – a traditional meat product of India: effects on quality and oxidative stability. *Journal of Food Science and Technology*. 2015;52:8104-8112. DOI: 10.1007/s13197-015-1960-7.
95. Rather JA, Akhter N, Rather SA, et al. Effect of xanthan gum treatment on the shelf-life enhancement of retorted meatballs (Goshtaba): A traditional meat product of India. *Measurement: Food*. 2024;13:100127. DOI: 10.1016/j.meafoc.2023.100127.
96. Hui YH, Corke H, De Leyn I, et al. *Bakery products: science and technology*. USA, Iowa, Ames: Wiley-Blackwell, 2008.
97. Zheng M, Chen J, Tan KB, et al. Development of hydroxypropyl methylcellulose film with xanthan gum and its application as an excellent food packaging bio-material in enhancing the shelf life of banana. *Food Chemistry*. 2022;374:131794. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.131794.
98. Rukmanikrishnan B, Ismail FRM, Manoharan RK, et al. Blends of gellan gum/xanthan gum/zinc oxide based nanocomposites for packaging application: rheological and antimicrobial properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020;148:1182-1189. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.155.
99. Tabassum Z, Girdhar M, Kumar A, et al. ZnO nanoparticles-reinforced chitosan-xanthan gum blend novel film with enhanced properties and degradability for application in food packaging. *ACS Omega*. 2023;8(34):31318-31332. DOI: 10.1021/acsomega.3c03763.
100. Tang S, Gong Z, Wang Z, et al. Multifunctional hydrogels for wound dressings using xanthan gum and polyacrylamide. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;217:944-955. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.07.181.
101. Singh S, Nwabor OF, Sukri DM, et al. Poly (vinyl alcohol) copolymerized with xanthan gum/hypromellose/sodium carboxymethyl cellulose dermal dressings functionalized with biogenic nanostructured materials for antibacterial and wound healing application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022;216:235-250. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.06.172.
102. Gutierrez-Reyes JE, Caldera-Villalobos M, Claudio-Rizo JA, et al. Smart collagen/xanthan gum-based hydrogels with antibacterial effect, drug release capacity and excellent performance in vitro bioactivity for wound healing application. *Biomedical Materials*. 2023;18(3):035011. DOI: 10.1088/1748-605X/acc99c.
103. Unalan I, Schrufer S, Schubert DW, et al. 3D-printed multifunctional hydrogels with phytotherapeutic properties: Development of essential oil-incorporated ALG-XAN hydrogels for wound healing applica-

- tions. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2023;9(7):4149-4167. DOI: 10.1021/acsbmaterials.3c00406.
104. Liang Y, Chitrakar B, Liu Z, et al. Preparation and characterization of 3D-printed antibacterial hydrogel with benzyl isothiocyanate. *International Journal of Bioprinting*. 2023;9(2):671. DOI: 10.18063/ijb.v9i2.671.
 105. Alves A, Miguel SP, Araujo ARTS, et al. Xanthan gum-konjac glucomannan blend hydrogel for wound healing. *Polymers*. 2020;12(1):99. DOI: 10.3390/polym12010099.
 106. Zuliani CC, Damas II, Andrade KC, et al. Chondrogenesis of human amniotic fluid stem cells in Chitosan-Xanthan scaffold for cartilage tissue engineering. *Scientific Reports*. 2021;11(1):3063. DOI: 10.1038/s41598-021-82341-x.
 107. Bueno VB, Bentini R, Catalani LH, et al. Synthesis and characterization of xanthan–hydroxyapatite nanocomposites for cellular uptake. *Materials Science and Engineering: C*. 2014;37:195-203. DOI: 10.1016/j.msec.2014.01.002.
 108. Barbosa RM, da Rocha DN, Bombaldi de Souza RF, et al. Cell-friendly chitosan-xanthan gum membranes incorporating hydroxyapatite designed for periodontal tissue regeneration. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):705. DOI: 10.3390/pharmaceutics15020705.
 109. Souza APC, Neves JG, Navarro da Rocha D, et al. Chitosan/Xanthan membrane containing hydroxyapatite/Graphene oxide nanocomposite for guided bone regeneration. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022;136:105464. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2022.105464.
 110. Souza AP, Neves JG, Navarro da Rocha D, et al. Chitosan/Xanthan/ Hydroxyapatite-graphene oxide porous scaffold associated with mesenchymal stem cells for dentin-pulp complex regeneration. *Journal of Biomaterials Applications*. 2023;37(9):1605-1616. DOI: 10.1177/08853282231155570.
 111. Singh A, Muduli C, Senanayak SP, et al. Graphite nanopowder incorporated xanthan gum scaffold for effective bone tissue regeneration purposes with improved biomineralization. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023;234:123724. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123724.
 112. Piola B, Sabbatini M, Gino S, et al. 3D Bioprinting of gelatin–xanthan gum composite hydrogels for growth of human skin cells. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23(1):539. DOI: 10.3390/ijms23010539.
 113. Anwar M, Pervaiz F, Shoukat H, et al. Formulation and evaluation of interpenetrating network of xanthan gum and polyvinylpyrrolidone as a hydrophilic matrix for controlled drug delivery system. *Polymer Bulletin*. 2021;78:59-80. DOI: 10.1007/s00289-019-03092-4.
 114. Jadav M, Pooja D, Adams DJ, et al. Advances in xanthan gum-based systems for the delivery of therapeutic agents. *Pharmaceutics*. 2023;15(2):402. DOI: 10.3390/pharmaceutics15020402.
 115. Kala S, Gurudiwan P, Juyal D. Formulation and evaluation of besifloxacin loaded in situ gel for ophthalmic delivery. *Pharmaceutical and Biosciences Journal*. 2018;6:36-40. DOI: 10.20510/ukjpb/6/i2/175583.
 116. Garg R, Kumar V, Sharma V. Design and characterization of flucytosine loaded bioadhesive in situ ophthalmic gel for improved bioavailability. *Pharmaceutical and Biosciences Journal*. 2019;7:17-20. DOI: 10.20510/ukjpb/7/i6/1581754222.
 117. Malik NS, Ahmad M, Minhas MU, et al. Chitosan/xanthan gum-based hydrogels as potential carrier for an antiviral drug: fabrication, characterization, and safety evaluation. *Frontiers in Chemistry*. 2020;8:50. DOI: 10.3389/fchem.2020.00050.
 118. Trombino S, Serini S, Cassano R, et al. Xanthan gum-based materials for omega-3 PUFA delivery: Preparation, characterization and antineoplastic activity evaluation. *Carbohydrate Polymers*. 2019;208:431-440. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.01.001.
 119. Singh S, Kotla NG, Tomar S, et al. A nanomedicine-promising approach to provide an appropriate colon-targeted drug delivery system for 5-fluorouracil. *International Journal of Nanomedicine*. 2015;10:7175-7182. DOI: 10.2147/IJN.S89030.
 120. Furtado IFSPC, Sydney EB, Rodrigues SA, et al. Xanthan gum: applications, challenges, and advantages of this asset of biotechnological origin. *Biotechnology Research and Innovation Journal*. 2022;6(1):e202204. DOI: 10.4322/biori.202205.
 121. Khattab H, Gawish AA, Hamdy A, et al. Assessment of a novel Xanthan gum-based composite for oil recovery improvement at reservoir conditions; assisted with simulation and economic studies. *Journal of Polymers and the Environment*. 2024;32:3363-3391. DOI: 10.1007/s10924-023-03153-w.

122. Olabode O, Akinsanya O, Daramola O, et al. Effect of salt concentration on oil recovery during polymer flooding: simulation studies on xanthan gum and gum arabic. *Polymers*. 2023;15(19):4013. DOI: 10.3390/polym15194013.
123. Abu Elella MH, Goda ES, Gab-Allah MA, et al. Xanthan gum-derived materials for applications in environment and eco-friendly materials: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020;9(1):104702. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104702.
124. Dzionek A, Wojcieszńska D, Guzik U. Use of xanthan gum for whole cell immobilization and its impact in bioremediation – a review. *Bioresource Technology*. 2022;351:126918. DOI: 10.1016/j.biortech.2022.126918.
125. Sorze A, Valentini F, Dorigato A, et al. Development of a xanthan gum based superabsorbent and water retaining composites for agricultural and forestry applications. *Molecules*. 2023;28(4):1952. DOI: 10.3390/molecules28041952.
126. Kumar P, Kumar B, Gihar S, et al. Review on emerging trends and challenges in the modification of xanthan gum for various applications. *Carbohydrate Research*. 2024;538:109070. DOI: 10.1016/j.carres.2024.109070.

Статья принята к публикации 07.04.2025 / The article accepted for publication 07.04.2025.

Информация об авторах:

Татьяна Григорьевна Волова¹, заведующая базовой кафедрой биотехнологии, заведующая лабораторией хемоавтотрофного биосинтеза, доктор биологических наук, профессор

Светлана Владиславна Прудникова², профессор базовой кафедры биотехнологии, доктор биологических наук, доцент

Екатерина Игоревна Шишачкая³, профессор кафедры медицинской биологии, главный научный сотрудник лаборатории хемоавтотрофного биосинтеза, доктор биологических наук, профессор

Information about the authors:

Tatyana Grigorievna Volova¹, Head of the Basic Department of Biotechnology, Head of the Laboratory of Chemoautotrophic Biosynthesis, Doctor of Biological Sciences, Professor

Svetlana Vladislavna Prudnikova², Professor at the Basic Department of Biotechnology, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor

Ekaterina Igorevna Shishatskaya³, Professor at the Department of Medical Biology, Chief Researcher of the Laboratory of Chemoautotrophic Biosynthesis, Doctor of Biological Sciences, Professor

