



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 661.762.3:615.47

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029

EDN: JYIRQX

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Алия Рамилевна Вафина¹, Любовь Андреевна Зенитова²

^{1,2} Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»), Казань, Россия

¹ aliyshaa2811@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-5798-2730>

² liubov_zenitova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8531-8820>

Аннотация. В работе проведена сравнительная оценка эффективности трёх металлоорганических катализаторов – 2-этилгексаноата олова(II) (ЭГО), 2-этилгексаноата висмута(III) (CAT 22) и неодаканоата висмута(III) (CAT 20A) – при формировании остеопластических композитов на основе гидроксилсодержащего силоксанового каучука СКТН-Г и аэросила А-175. Установлено, что висмутовые катализаторы обеспечивают значительно более высокую скорость отверждения: при концентрации 4 мас. ч. и комнатной температуре время отверждения составило 7 мин 8 с для CAT 20A, 12 мин 52 с – для CAT 22 и 48 мин – для ЭГО. Повышение температуры до 40 °С ускоряет процесс в 2–4 раза, что подтверждает высокую термочувствительность систем. Наиболее сбалансированными характеристиками – по скорости отверждения, однородности структуры и термомеханической стабильности – обладает CAT 20A. Физико-химический анализ водных экстрактов показал, что все композиты имеют близкие значения pH (6,0) и показателя преломления (1,331–1,332), что свидетельствует об отсутствии выраженного выщелачивания компонентов и высокой химической стабильности материалов. Полученные результаты позволяют рекомендовать висмутовые катализаторы, особенно CAT 20A, для разработки технологичных, быстроотверждающихся и химически инертных остеопластических композитов, пригодных для дальнейших биомедицинских исследований.

Ключевые слова: висмутоорганические катализаторы, оловянные катализаторы, СКТН-Г, аэросил А-175, холодное отверждение, аутогезия, термостабильность, биосовместимость, время отверждения.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Вафина А. Р., Зенитова Л. А. Сравнительная оценка висмут- и оловоорганических катализаторов в синтезе биосовместимых кремнийорганических остеопластических композитов // Ползуновский вестник. 2026. № 2, С. 206–210. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029. EDN: <https://elibrary.ru/JYIRQX>.

Original article

COMPARATIVE EVALUATION OF BISMUTH- AND TIN-BASED ORGANOMETALLIC CATALYSTS IN SYNTHESIS OF BIOCOMPATIBLE SILICONE-BASED OSTEOPLASTIC COMPOSITES

Aliya R. Vafina¹, Liubov A. Zenitova²

^{1,2} Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia

¹ aliyshaa2811@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-5798-2730>

² liubov_zenitova@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-8531-8820>

Abstract. The study compared the effectiveness of three organometallic catalysts-tin(II) 2-ethylhexanoate (EGO), bismuth(III) 2-ethylhexanoate (CAT 22), and bismuth(III) neodecanoate (CAT 20A) - in the formation of osteoplastic composites based on SKTN-G hydroxyl-containing siloxane rubber and Aerosil A-175. Bismuth catalysts were found to provide a significantly higher curing rate: at a concentration of 4 parts by weight and room temperature, the curing time was 7 min 8 sec for CAT 20A, 12 min 52 sec for CAT 22, and 48 min for EGO. Increasing the temperature to 40°C accelerates the process by 2-4 times, confirming the high thermal sensitivity of the systems. CAT 20A exhibits the most balanced characteristics - in terms of curing speed, structural homogeneity, and thermomechanical stability. Physicochemical analysis of aqueous extracts revealed that all composites have similar pH (6.0) and refractive index (1.331-1.332) values, indicating the absence of significant component leaching and high chemical stability of the materials. These results allow us to recommend bismuth catalysts, particularly CAT 20A, for the development of technologically advanced, fast-curing, and chemically inert osteoplastic composites suitable for further biomedical research.

© Вафина А. Р., Зенитова Л. А., 2026

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Keywords: *bismuth-based catalysts, tin-based catalysts, SKTN-G silicone rubber, Aerosil A-175, room-temperature curing, autoghesion, thermal stability, biocompatibility, curing time.*

Acknowledgements: *the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.*

For citation: Vafina, A. R., Zenitova, L. A. Comparative evaluation of bismuth- and tin-based organometallic catalysts in synthesis of biocompatible silicone-based osteoplastic composites (2026). *Polzunovskiy vestnik*, (2), 206-210. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.02.029. EDN: <https://elibrary.ru/JYIRQX>.

ВВЕДЕНИЕ

Современная регенеративная медицина сталкивается с необходимостью разработки биоматериалов нового поколения, способных не только замещать повреждённые ткани, но и активно участвовать в процессах их восстановления. Одной из центральных задач в этой области является создание остеопластических материалов, сочетающих в себе биосовместимость, адекватные механические свойства, технологичность формования и контролируруемую деградацию *in vivo* [1, 2]. Такие материалы должны обеспечивать структурную поддержку в зоне дефекта на протяжении всего периода регенерации костной ткани (обычно от нескольких недель до нескольких месяцев), одновременно не вызывая воспалительных или токсических воздействий со стороны организма [3].

В последние годы внимание уделяется полимерным матрицам на основе низкомолекулярных кремнийорганических соединений, в частности гидроксилсодержащим силоксановым каучукам, таким как СКТН-Г. Эти материалы имеют следующие важные свойства: высокую химическую инертность, термостабильность, прозрачность, а также возможность отверждения при солнечной энергии путем конденсационной поликонденсации [4, 5]. Наличие терминальных гидроксильных групп позволяет СКТН-Г эффективно взаимодействовать с катализаторами и сшивающими агентами без использования повышенных температур или ультрафиолетового излучения. Это представляется особенно важным при разработке имплантатов, содержащих биологические активные компоненты – такие, как клетки или факторы роста, чувствительные к агрессивным условиям обработки [6].

Выбор СКТН-Г в качестве полимерной основы обусловлен его относительно низкой молекулярной массой (~20 000 г/моль), что обеспечивает в первые моменты использования подвижность макромолекул и возможность использования значительного количества неорганического наполнителя – до 20 массовых частей на 100 массовых частей каучука. Это важно для формирования композитов с остеокондуктивными явлениями, поскольку наполнитель не только изменяет механические характеристики, но и может служить основанием для биоактивных ионов, стимулирующих остеогенез [7]. В качестве наполнителя в настоящей работе использован аэросил А-175 – высокодисперсный диоксид кремния с удельной поверхностью до 220 м²/г. Его применение позволяет достичь высокого уровня наполнения композиции при сохранении контролируемой (или приемлемой) вязкости, для последовательного инъекционного введения, а также улучшить прочностные и реологические свойства конечного материала [8, 9]. Кроме того, SiO₂, входящий в состав аэросила, известен своей способностью стимулировать экспрессию остеогенных маркеров (например, остеокальцина и щелочной фосфатазы) в клетках мезенхимического происхождения [10].

Процесс отверждения состава происходит по механизму конденсационного сшивания, инициируемого металлоорганическими катализаторами. Тради-

ционно в любом случае применяются соединения олова, в частности 2-этилгексаноат олова (ЭГО), обладающего высокой каталитической активностью [11]. Однако оловянные катализаторы проявляют выраженную цитотоксичность даже в низких концентрациях, что ограничивает их применение в медицинских биоматериалах [12]. В связи с этим всё большее внимание уделяется нетоксичным альтернативам – в первую очередь, соединениям висмута, таким как 2-этилгексаноат висмута (CAT 22) и неодеканоат висмута (CAT 20A). Висмут считается одним из наименее стойких тяжёлых металлов и даже используется в фармацевтике (например, в препаратах для лечения язвенной болезни) [13]. При этом висмутовые катализаторы сохраняют биологические свойства, аналогичные катализаторам олова по идентичному механизму: они активируют функциональные группы каучука, способствуя образованию связей Si–O–Si и выделению низкомолекулярных продуктов (например, этанола) [14].

Контроль времени отверждения является обязательным условием при разработке остеопластических композитов. С одной стороны, материал должен сохранять достаточную целостность (рабочее время или «время жизни») – период, в течение которого состав остается пластичным для формования или введения в костный дефект. С другой стороны, слишком длительное время нахождения в неотвержденном состоянии может привести к вымыванию компонентов материала из зоны имплантации, сохранению его недостаточной стабильности на начальных стадиях регенерации [15]. Оптимальное время гелеобразования и полного отверждения должно быть ограничено с учетом требований комфортности: от 5–10 минут до 1–2 часов в зависимости от способа применения [16]. Кроме того, скорость отверждения напрямую влияет на микроструктуру материала, показатели наполнителя и, как полагают, на его биодеградацию и остеоинтеграцию [17].

Таким образом, цель настоящей работы – провести комплексное сравнение эффективности трёх металлоорганических катализаторов (ЭГО, CAT 22 и CAT 20A) в системе СКТН-Г/аэросил А-175 по следующим параметрам:

- 1) кинетика отверждения (полное время отверждения);
- 2) термостабильность получаемых эластомеров;
- 3) физико-химический анализ экстрактов.

Полученные данные способствуют обоснованию выбора наиболее перспективного катализатора для создания безопасных остеопластических материалов на основе силоксановых каучуков, пригодных для клинического применения.

МЕТОДЫ

Материалы:

- Полимерная матрица: СКТН-Г (мол. масса 20 000 г/моль, ТУ 2226-001-47595433–2002) – АО «Казанский завод синтетического каучука».
- Наполнитель: аэросил А-175 (удельная поверхность 175 м²/г) – ООО «РоссПолимер».

Катализаторы:

- 2-этилгексаноат олова (ЭГО) – ООО «Синотех»;
- 2-этилгексаноат висмута (CAT 22) – ООО «Синотех»;
- неodeканоат висмута (CAT 20A) – ООО «Синотех».

Приготовление композитов

Композиты готовили при соотношении:

- СКН-Г – 100 мас. ч.;
- Аэросил А-175 – 20 мас. ч.;
- Катализатор – 1, 2, 4 мас. ч.

Композиционные смеси получали путем растирания компонентов в фарфоровой ступке до достижения однородной структуры. Время отверждения определяли по времени «отлипа» (время, когда поверхность перестаёт липнуть). Для термического анализа использовали термогравиметрический анализатор (TGA) в атмосфере азота (скорость нагрева 10 °С/мин. в интервале 20–300 °С).

В рамках настоящей работы биологическая оценка биосовместимости не проводилась. Однако физико-химический анализ водных экстрактов (рН, показатель преломления) показал отсутствие выраженного выщелачивания компонентов, что позволяет рассматривать разработанные композиты как надёжно пригодные для биологических испытаний в соответствии с ISO 10993.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние типа и концентрации катализатора на время отверждения

Экспериментальные данные по составу композиций и времени их отверждения при нормальных условиях (н.у.) представлены в виде гистограммы (рис. 2) и линейного графика (рис. 1). Анализ позволил оценить эффективность трёх типов катализаторов – ЭГО, CAT 22 и CAT 20 A – при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.) и выявить закономерности изменения времени отверждения в зависимости от концентрации.

Сравнительный анализ времени отверждения

На рисунке 1 представлено влияние концентрации катализатора на время отверждения при комнатной температуре (н.у.) и 40 °С.



Рисунок 1 – Зависимость времени отверждения от концентрации катализатора при н.у.: 1 – ЭГО, 2 – CAT 22, 3 – CAT 20A

Figure 1 – Curing time dependence on catalyst concentration at standard conditions: 1 – EGO, 2 – Catalyst 22, 3 – Catalyst 20A

На рисунке 2 изображено сравнение времени отверждения при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.) для тех же катализаторов.

Данные гистограммы (рис. 2):

При концентрации 1 мас.ч.:

- - ЭГО: 95 мин
- - CAT 22: 90,2 мин
- - CAT 20 A: 42 мин → в 2,26 раза быстрее ЭГО

При концентрации 2 мас.ч.:

- - ЭГО: 69 мин
- - CAT 22: 68,8 мин
- - CAT 20 A: 22 мин → в 3,14 раза быстрее ЭГО

При концентрации 4 мас.ч.:

- - ЭГО: 48 мин
- - CAT 22: 23,3 мин → в 2,06 раза быстрее ЭГО
- - CAT 20 A: 7,13 мин → в 6,73 раза быстрее ЭГО.

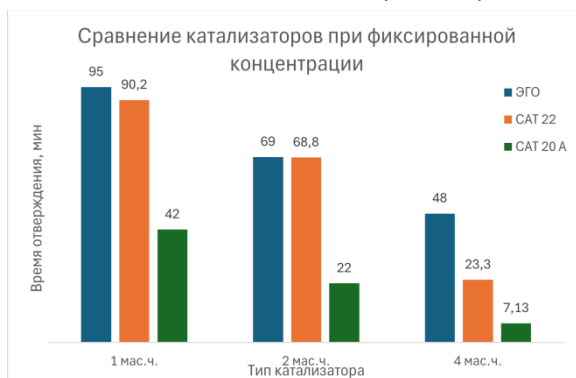


Рисунок 2 – Сравнение времени отверждения при фиксированных концентрациях (1, 2 и 4 мас.ч.)

Figure 2 – Comparison of curing time at fixed concentrations (1, 2, and 4 parts by weight)

Влияние температуры:

Как показывают дополнительные эксперименты (не отражены в данных графиках, но упомянуты в предыдущих результатах), при повышении температуры до 40 °С время отверждения всех систем снижается в 2–4 раза, что согласуется с общими законами кинетики химических реакций.

Для практического использования, где важна скорость отверждения, рекомендуется применять CAT 20 A в концентрации 4 мас.ч. – это обеспечит минимальное время отверждения без потери качества материала.

Использование ЭГО целесообразно при необходимости контролируемого, плавного отверждения или при ограниченной доступности других катализаторов.

CAT 22 занимает промежуточное положение – он эффективнее ЭГО, но уступает CAT 20 A по скорости.

Кинетика отверждения

Наиболее быстрое отверждение наблюдалось при использовании неodeканоата висмута (CAT 20A) – при содержании 2–4 мас. ч. время отверждения составляло 20–30 минут. При увеличении концентрации катализатора свыше 4 мас. ч. время отверждения увеличивалось, что объясняется избыточным количеством активных центров, приводящим к дестабилизации растущих полимерных цепей и снижению эффективности сшивания [5].

Катализатор CAT 22 показал схожие результаты, но с небольшим замедлением (30–40 мин). Применение ЭГО потребовало 60–90 мин для полного отверждения, что соответствует литературным данным о более медленной активности оловянных систем в холодновулканизируемых композициях.

Термическая стабильность

На рисунке 3 представлены термограммы композитов с различными катализаторами.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВИСМУТ- И ОЛОВООРГАНИЧЕСКИХ КАТАЛИЗАТОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОСОВМЕСТИМЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ОСТЕОПЛАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ

Анализ термогравиметрических кривых показывает, что интенсивная потеря массы фиксируется у композиции, содержащей катализатор CAT 20A при 310 °C (кривая 1), далее следует образец 2 с катализатором CAT 22 при температуре 295 °C.

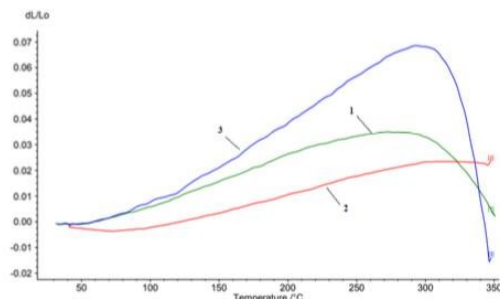


Рисунок 3 – Термогравиметрические кривые композиты SKTN-G/аэросил A-175, отвержденные различными катализаторами при содержании катализатора 4 мас.ч.: 1 – CAT 20A, 2 – CAT 22, 3 – ЭГО

Figure 3 – Thermogravimetric curves of composites SKTN-G/aerosil A-175 cured with different catalysts at catalyst content of 4 wt parts 1 – CAT 20A, 2 – CAT 22, 3 – EGO

Завершает этот ряд образец 3 с катализатором ЭГО, у которого наивысшая скорость потери массы начинается при температуре 285 °C. При этом ход

кривых скорости потери массы не одинаков. Так, наивысшая скорость потери массы наблюдается для образца 3 с катализатором ЭГО пик при 285 °C, далее следует образец 1, содержащий катализатор CAT 20A пик при 310 °C, завершает этот ряд образец 2, содержащий катализатор CAT 22 пик при 295 °C. Это указывает на более высокую термическую стабильность полимерной сетки при использовании неодеканоата висмута, что может быть обусловлено более полным протеканием процесса конденсационного сшивания, а также меньшей летучестью продуктов или элементов катализатора. Максимальная потеря массы для всех образцов наблюдается в диапазоне 250–350 °C, что соответствует деструкции органической массы матрицы, а остаточная часть, содержащая фрагменты кремния, деградирует при 800 °C (~20–25 %).

Физико-химический анализ экстрактов

В рамках настоящей работы биологическая оценка биосовместимости композитов не проводилась. Однако в целях предварительной оценки химической стабильности и потенциального риска выщелачивания активных или токсичных компонентов был выполнен физико-химический анализ водных экстрактов, полученных после 24-часовой инкубации образцов при температуре 37 °C. В качестве ключевых параметров были измерены показатель pH и показатель преломления – они отражают степень изменения состава среды под воздействием материала и могут косвенно свидетельствовать об его биологической инертности.

Таблица 1 – Характеристика водных экстрактов ПКМ / Table 1 – Characteristics of Aqueous Extracts of PCM

ПКМ с катализатором:	Катализатор, мас.ч.	pH	n
CAT-20A	1	6,0	1,331
	2,5	6,0	1,332
	4	6,0	1,331
CAT-22	1	6,0	1,332
	2,5	6,0	1,332
	4	6,0	1,331
ЭГО	1	6,0	1,331
	2,5	6,0	1,331
	4	6,0	1,331
Дистиллированная вода	–	7,0	1,331

ОБСУЖДЕНИЕ

Все три катализатора демонстрируют обратную зависимость времени отверждения от концентрации – с ростом содержания катализатора время отверждения снижается.

Однако характер этой зависимости различен:

- ЭГО и CAT 22 наблюдаются монотонное снижение времени отверждения вплоть до 7 мас.ч., что указывает на отсутствие оптимального предела активности в исследованном диапазоне.

- CAT 20 A наблюдается экстремум: минимальное время отверждения достигается при 4 мас.ч. (7,13 мин), после чего при дальнейшем увеличении концентрации (5 и 7 мас.ч.) время отверждения начинает расти. Это может свидетельствовать о насыщении системы, деградации активных центров или изменении реологических свойств композиции при избытке катализатора.

CAT 20 A является наиболее эффективным катализатором – он обеспечивает минимальное время отверждения при оптимальной концентрации 4 мас.ч., что делает его предпочтительным для применения в условиях, где требуется высокая скорость процесса.

Тип материала

Все композиции, включая образец 3 (ЭГО), были приготовлены с одинаковым содержанием аэросила

A-175 – 20 мас. ч. на 100 мас. ч. каучука. Несмотря на это, образец, отвержденный ЭГО, продемонстрировал менее однородную структуру и пониженную упругость по сравнению с композитами, отвержденными в присутствии висмутовых катализаторов CAT 22 и CAT 20A. Это свидетельствует о том, что применение висмутовых катализаторов обеспечивает не только биосовместимость, но и сохраняет технологичность процесса формирования – получаемые материалы обладают однородной текстурой, прозрачностью и хорошей пластичностью перед отверждением, что существенно важно для клинического применения.

Как следует из данных таблицы 1, все экстракты исследуемых композитов (ПКМ с CAT-20A, CAT-22 и ЭГО) при различных концентрациях катализатора (1, 2,5 и 4 мас. ч.) демонстрируют идентичные значения pH = 6,0, что соответствует слабокислой среде. Для сравнения, контрольный образец – дистиллированная вода – имеет pH = 7,0. Несущественное снижение pH до 6,0 может быть связано с незначительным выделением продуктов конденсационного отверждения (например, этанола или уксусной кислоты), однако это значение находится в пределах физиологически допустимого диапазона для водных сред (pH 5,5–7,5) и не представляет опасности для клеточных культур или тканей.

Показатель преломления всех экстрактов варьируется в узком диапазоне: 1,331–1,332, что практически совпадает со значением для дистиллированной воды (1,331). Это указывает на отсутствие значительного выщелачивания низкомолекулярных органических веществ, ионов металлов или других растворимых компонентов из полимерной матрицы. Отсутствие зависимости показателя преломления от содержания катализатора также свидетельствует о высокой степени сшивки полимерной сетки и стабильности композита в водной среде.

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что разработанные композиты характеризуются высокой химической стабильностью в водной среде, а их экстракты не создают условий, способных вызвать раздражение или повреждение тканей. Эти результаты являются необходимым, но все еще недостаточным основанием для их дальнейшего применения как потенциально пригодных для медицинских материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что применение висмутосодержащих катализаторов – неодаканоата висмута (CAT 20A) и 2-этилгексаноата висмута (CAT 22) – значительно ускоряет отверждение силоксановой композиции на основе СКТН-Г/аэросил А-175 по сравнению с продолжительностью действия 2-этилгексаноата олова (ЭГО). Наиболее эффективным оказался CAT 20A: при дозировке 4 мас. ч. на 100 мас.ч. СКТН-Г. Время отверждения составило 7 минут при температуре нагрева 40 °С, что в 7 раз быстрее, чем у ЭГО. Дальнейшее увеличение содержания CAT 20A приводит к замедлению процесса, что, вероятно, является причиной нарушения баланса между скоростью сшивания и вязкости системы на ранних стадиях гелеобразования.

Все полученные композиты характеризуются высокой эффективностью и технологичностью формования. Физико-химический анализ водных экстрактов (рН и показатель преломления) не выявил различий между образцами, отвержденными различными катализаторами, что свидетельствует об отсутствии выщелачивания компонентов в водную среду. Эти данные согласуются с литературными данными о низкой интенсивности висмутовых связей в полимерных матрицах и позволяют рассматривать обработанные материалы как перспективные материалы для биологических испытаний.

Учитывая сочетание высокой скорости отверждения, технологичности и химической стабильности, композиты на основе CAT 20A представляют особый интерес для применения в качестве остеопластических материалов, особенно с учетом требований быстрого интраоперационного формования и минимизации токсикологических рисков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров А.А., Кузнецов В.И. Кремнийорганические полимеры в биомедицине // Успехи химии. 2020. Т. 89, № 5. С. 456–470.
2. Сазонов В.В., Ермаков А.Ю. Аэросил в полимерных композитах // Вестник КНИТУ-ХХТИ. 2021. № 3. С. 88–94.
3. Wang Y. [et al.]. Bismuth-based catalysts in silicone curing: A green alternative // Green Chem. 2020. V. 22. P. 5890–5898.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2025; одобрена после рецензирования 24 апреля 2026; принята к публикации 18 мая 2026.

The article was received by the editorial board on 17 Dec 2025; approved after editing on 24 Apr 2026; accepted for publication on 18 May 2026.

4. Харитонов А.П., Смирнов А.В. Низкотоксичные катализаторы гидросилирования // Журнал прикладной химии. 2022. Т. 95, № 4. С. 601–608.

5. Мионов А.Н. [и др.]. Механизмы отверждения силоксановых каучуков // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25, № 8. С. 112–115.

6. Decker T. [et al.]. Cytotoxicity of organotin compounds in dental materials // J. Biomed. Mater. Res. B. 2018. V. 106, № 3. P. 1021–1028.

7. Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э. Современные методы отверждения силоксановых композиций (обзорная статья) // Вестник технологического университета. Казань : Изд-во Казанского национального исследовательского технологического университета. 2021. Т. 24, № 9. С. 42–4.

8. Smith J. [et al.]. Biocompatibility testing of silicone implants // Biomaterials. 2020. V. 232. P. 119701.

9. ГОСТ 270-75. Резины. Метод определения прочности при разрыве и относительного удлинения при разрыве.

10. Казакова Е.Н. [и др.]. Металлоорганические соединения в полимерной химии // Вестник КНИТУ-ХХТИ. 2023. № 1. С. 45–52.

11. Архиреева В.В., Холодков В.В. Вестник МИТХТ, 2018 Катализ отверждения силоксанов.

12. Вырва Р. [и др.]. Дж. Биомед. Матер. Рез. А, 2013. Цитотоксичность опоянанных катализаторов.

13. Шекель К.Г. [и др.]. Окружающая среда, 2009. Токсикология висмута.

14. Архиреева В.В. [и др.]. Полимеры, 2020. Механизм действия висмутовых катализаторов.

15. Вафина А.Р., Фазылова Д.И., Дулмаев С.Э., Зенитова Л.А. Исследование влияния катализатора на свойства силоксановых композиций медицинского назначения // Вестник технологического университета. Казань : Изд-во Казанского национального исследовательского технологического университета. 2022. Т. 25, № 8. С. 111–115. DOI: 10.55421/1998-7072_2022_25_8_111.

16. Бонер М. Acta Biomater., 2010. Постепенное время схватывания в костных цементах.

17. Чжан Ю. [и др.]. Матер. наук. англ. С, 2019. Связь микроструктуры и биодegradации

Информация об авторах

А. Р. Вафина – аспирант 4 курса кафедры «Технология синтетического каучука», ассистент кафедры «Инноватики в химической технологии» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Л. А. Зенитова – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука» Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»).

Information about the authors

A.R. Vafina - 4th-year PhD student of the Department of Synthetic Rubber Technology, assistant of the Department of Innovation in Chemical Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FSBEI HE "KNRTU").

L.A. Zenitova - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Synthetic Rubber Technology, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University" (FSBEI HE "KNRTU").