

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2026. Т. 28. № 3. С. 255–276.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2026; 28 (3): 255–276.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691

<https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-255-276>



EDN: LRKJEK

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ХРИЗОТИЛОВЫЕ ВОЛОКНА КАК СТРУКТУРИРУЮЩИЙ КОМПОНЕНТ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Людмила Николаевна Наумова, Валерия Валерьевна Строкова,
Павел Александрович Куценко, Алина Валентиновна Абзалилова,
Данил Андреевич Рулев**

*Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Россия*

Аннотация. Актуальность анализа результатов исследований, посвященных различным способам модифицирования волокон хризотилового асбеста, приводящих к структурным изменениям и, как следствие, влияющих на их физико-механические характеристики, обусловлена возможностью расширения областей применения модифицированного хризотила. Также актуальным остается изучение состояния потребительской способности хризотила и хризотилсодержащих материалов с учетом экологического аспекта процессов переработки и использования волокон.

Цель. Комплексный анализ научных работ за период 1967–2025 гг., посвященных вопросам изучения возможности модифицирования волокон хризотилового асбеста. Выявление технологических особенностей различных методов обработки волокна: механического, химического, термического, комбинированного. Анализ влияния метода обработки волокон на изменение их поверхностных и физико-механических свойств.

Методы. В работе систематизированы результаты научного поиска по методам обработки хризотила, структурным особенностям и способам модификации хризотилowych волокон и последующем применении их в качестве структурирующего компонента материалов различного назначения. Выполнен анализ публикационной активности отечественных и зарубежных ученых, подтверждающий актуальность применения хризотила.

Результаты. Произведена классификация способов модификации волокон хризотила по параметрам обработки волокна. Выделены методы термической обработки, механического и химического воздействия, комбинированные способы модифицирования фибрилл хризотила. Указаны технологические параметры каждого из описанных методов, а также представлены структурные изменения хризотилового волокна и возможные области его применения как структурирующего компонента не только при изготовлении хризотилцементных изделий, но и при производстве сорбентов, катализаторов, полимерных материалов, а также в металлургической отрасли.

Ключевые слова: хризотил, хризотилцементные изделия, асбест, композиционные материалы, структурные характеристики, механическая обработка, химическая обработка

Финансирование: работа выполнена в рамках реализации государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2026-0005 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Для цитирования: Наумова, Л.Н., Строкова, В.В., Куценко, П.А., Абзалилова, А.В., Рулев, Д.А. Модифицированные хризотилловые волокна как структурирующий компонент композиционных материалов различного назначения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2026. Т. 28. № 3. С. 255–276. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-255-276>. EDN: LRKJEK

ORIGINAL ARTICLE

MODIFIED CHRYSOTILE FIBER AS STRUCTURING COMPONENT OF DIFFERENT COMPOSITE MATERIALS

Lyudmila N. Naumova, Valeria V. Stroкова, Pavel A. Kutsenko,
Alina V. Abzalilova, Danil A. Rulev

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
Belgorod, Russia

Abstract. It is important to study consumer ability of chrysotile and chrysotile-containing materials, taking into account the environmental aspect of fiber processing and applications.

Purpose: Identification of different fiber processing methods, such as mechanical, chemical, thermal, combined. Investigation of the fiber processing effect on their surface and physical and mechanical properties.

Methodology: A comprehensive analysis of the literature of the period 1967–2025 devoted to the modification of chrysotile asbestos fiber, description of chrysotile processing methods, structural properties and methods of modification of chrysotile fibers, and their subsequent use as a structuring component of materials for various purposes.

Research findings: Methods of modification of chrysotile locks are classified according to processing parameters. The heat treatment, mechanical and chemical effects, combined methods of modifying chrysotile fibrils are highlighted. Technological parameters of described methods are indicated, as well as structural changes in chrysotile fiber and possible fields of its application as a structuring component not only in the manufacture of chrysotile cement products, but also in the production of sorbents, catalysts, polymer materials, and metallurgical industry.

Keywords: chrysotile cement product, asbestos, composite material, structural properties, mechanical processing, chemical processing

Funding: Research was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project N FZWN-2026-0005).

For citation: Naumova, L.N., Stroкова, V.V., Kutsenko, P.A., Abzalilova, A.V., Rulev, D.A. Modified Chrysotile Fiber as Structuring Component of Different Composite Materials. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2026; 28(3): 255–276. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2026-28-3-255-276>. EDN: LRKJEK

Введение

Применение хризотила при производстве строительных материалов имеет многолетнюю историю. Являясь волокнистым минералом, хризотилловый асбест обладает повышенной эластичностью, отличается устойчивостью

к воздействию высоких температур, благодаря чему хризотил нашел широкое применение как в строительной, так и в других отраслях промышленности. Модифицирование волокон хризотила путем механического, химического и другого воздействия приводит к изменению поверхностных и структурных свойств. В зависимости от способа обработки фибриллы хризотила характеризуются лучшей адгезией, повышенными физико-механическими показателями, устойчивостью к агрессивным средам, что необходимо для их дальнейшего использования при получении различных видов материалов. Так, после распушки хризотилвый асбест может выступать микроармирующим компонентом для матрицы цемента при производстве хризотилцементных изделий, что позволит повысить прочностные характеристики композита, особенно при его работе на изгиб.

Терминологический аспект понятия «асбест» и отличительные свойства хризотила

Природное хризотилвое волокно входит в общее терминологическое понятие «асбест». Данный термин объединяет две группы природных силикатных минералов – серпентиновый и амфиболовый асбесты (таблица).

Классификация и месторождения хризотила Chrysotile classification and deposits

Разновидность асбеста	Химический состав	Основные месторождения
Серпентины		
Хризотил	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Россия, Бразилия, Канада, Китай, Зимбабве, Казахстан, Южная Африка
Антигорит	$(Mg, Fe^{2+})_3Si_2O_5(OH)_4$	Россия, Казахстан, Канада
Лизардит (ортоантигорит)	$Mg_3Si_2O_5(OH)_4$	Канада, США, Великобритания, Австрия, Южная Африка
Амфиболы		
Антофиллит	$(Mg, Fe)_7(OH)_2[Si_8O_{22}]$	Северная Америка
Амозит	$(Fe^{2+}, Mg)_7Si_8O_{22}(OH)_2$	Южная Африка
Тремолит	$Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Италия, Африка, Балканы, Америка
Актинолит	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_5Si_8O_{22}(OH)_2$	Северная Америка
Крокидолит	$(Na_2Fe_3^{2+}Fe_2^{3+})Si_8O_{22}(OH)_2$	Южная Африка
Родусит	$Na_2(Mg, Fe^{2+})_3Fe_2^{3+}(Si_8O_{22})(OH)_2$	Австралия, Боливия, Зимбабве
Режикит	$Na_5(Mg, Fe^{2+})_{10}Fe_2^{3+}(Si_{16}O_{44})(OH)_4$	Россия, Средняя Азия, Украина
Рихтерит	$Na_2Ca_2Mg_{10}^{+}(Si_{16}O_{44})(OH)_4$	США, ЮАР, Италия, Финляндия

Серпентиновые и амфиболовые асбесты принципиально различаются по своей структуре. Основным минералом серпентиновой группы является хризотил (или хризотил-асбест), который в основном добывают и используют в промышленных масштабах, в том числе в России.

Хризотил-асбест является водным силикатом магния и имеет теоретическую формулу $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [1–3]. В подгруппе хризотила различают три минеральных вида – клинохризотил, ортохризотил и парахризотил [3]. Кристаллы хризотил-асбеста существуют в трех указанных модификациях, но наиболее распространен клинохризотил, тонковолокнистая разновидность которого называется хризотил-асбестом.

Среди асбестовых минералов амфиболовой группы различают четыре класса: магнезиальные и магнезиально-железистые (антофиллит, куммингтонит); кальциевые (тремолит, актинолит); щелочесодержащие (рихтерит); щелочные (крокидолит, режикит, родусит) [1–5].

Методы

Анализ проведенных научных исследований основывался на поиске публикаций в научной электронной базе eLibrary.ru и полнотекстовой базе данных ScienceDirect за 1967–2025 гг. Поиск публикаций осуществлялся по тематике, связанной со способами обработки и модифицирования волокон хризотил-асбеста. Терминологический поиск осуществлялся на следующие понятия: «хризотил», «модифицированный хризотил», «поверхностная обработка хризотила», «модификация хризотила солями», «кислотная обработка хризотила различными кислотами», «щелочная обработка хризотила». По данному терминологическому поиску было найдено всего 936 публикаций на основе базы eLibrary.ru (рис. 1), из которых 892 были посвящено хризотилу (X); 39 – модифицированию хризотила (MX); 5 – поверхностной обработке хризотила (ХПО); 14 – модифицированию хризотила солями (MXC); 9 – кислотной обработке хризотила различными кислотами (KX); 3 – щелочной обработке хризотила (ЩХ).

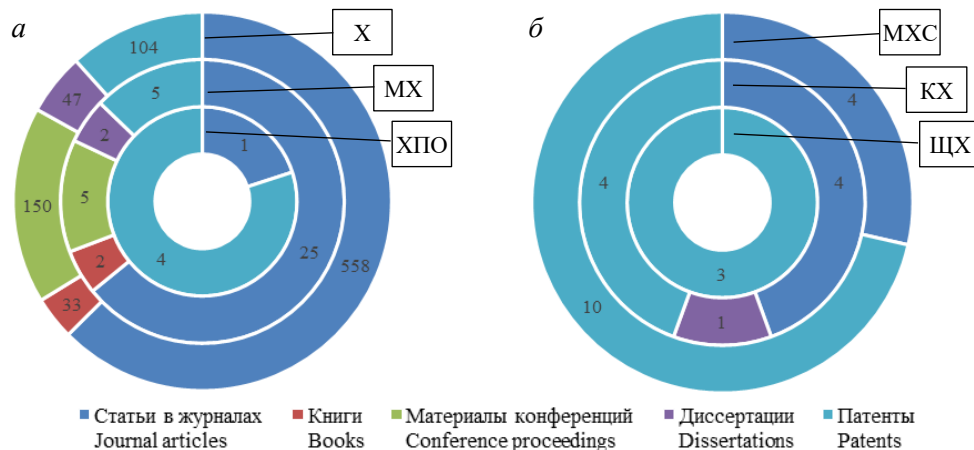


Рис. 1. Качественный и количественный анализ базы eLibrary по запросу:
 а – хризотил (X), модифицированный хризотил (MX), поверхностная обработка хризотила (ХПО); б – модификация хризотила солями (MXC), кислотная обработка хризотила различными кислотами (KX), щелочная обработка хризотила (ЩХ)

Fig. 1. Qualitative and quantitative analysis of eLibrary database:
 а – chrysotile (X), modified chrysotile (MX), surface treatment of chrysotile (ХПО);
 б – modification of chrysotile with salts (MXC), acid treatment of chrysotile with various acids (KX), alkaline treatment of chrysotile (ЩХ)

Анализ публикационной активности (рис. 2) охватывает период с 2000 по 2025 г., т. к. более ранние работы с 1967 по 2000 г. представлены фрагментарно. Недостаток оцифрованных материалов того времени и ограниченность доступа не позволяют сформировать полную выборку публикаций, начиная с 1967 г.

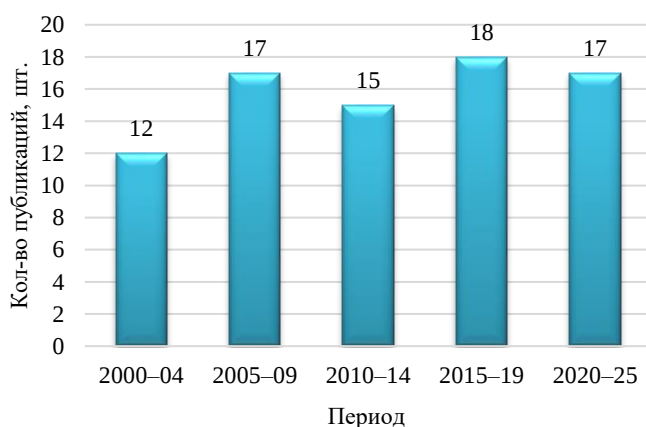


Рис. 2. Публикационная активность по годам за период 2000–2025 гг.

Fig. 2. Publication activity for the years 2000–2025

Высокие количественные значения отклика и публикаций свидетельствуют о том, что до настоящего времени интерес в области использования хризотила не теряет актуальности.

Экологический аспект использования волокон хризотила

Экологические вопросы переработки и применения волокон хризотила являются значимыми в силу преимуществ их физико-химических свойств до настоящего времени и непосредственно связаны с медико-биологическими исследованиями.

Канцерогенные свойства асбеста зависят от его вида и способности микроскопических волокон накапливаться в легких и вызывать тяжелые заболевания и связаны с особенностями строения волокон и их устойчивостью к действию кислот [6, 7]. Так, волокна амфиболовых асбестов имеют игольчатую форму, являются хрупкими, не разрушаются в кислой среде, их размер и прочность выше, по сравнению с хризотилвыми. Амфиболовые волокна практически не выводятся из организма человека, и на основании данных фактов их применение повсеместно запрещено [8–10].

Хризотилвые волокна более эластичны, не являются кислотоустойчивыми, вследствие чего при попадании в организм человека способны разрушаться за счет кислой среды макрофагов (клеток) легких и выводиться из организма за относительно короткое время.

Несмотря на множество проведенных исследований и разработок в области заменителей хризотилвых материалов, до настоящего времени не существует природных и синтетических волокнистых материалов, которые по комплексу потребительских свойств были бы идентичны хризотилу. Показатели

технических и технологических характеристик искусственных волокнистых заменителей ниже по сравнению с хризотилом [11–13].

Экономическая эффективность использования природных хризотилковых волокон во много раз превышает эффективность использования искусственных волокнистых заменителей [14]. Главным является то, что заменители хризотила не являются безопасными для человека. Сравнительный анализ периода полураспада (количество времени, в течение которого из легких выводится 50 % содержания волокон после завершения экспозиции) натуральных волокон и искусственных волокнистых заменителей показал следующее: волокна хризотила выводятся из организма в течение 12 дней, амфибола – 536 дней, волокна целлюлозы – 1046 дней, стекловолна – до 79 дней. Термолит-асбест из легких не выводится [15].

Улучшение условий труда при добыче, производстве и применении асбеста позволило снизить концентрации хризотилковых волокон в воздухе рабочей зоны, что привело к снижению числа опасных асбестообусловленных заболеваний. На основании этого был сделан вывод о возможности безопасного применения асбеста в случае контролируемого его использования [16, 17].

Анализ состояния потребительской способности хризотила и хризотилсодержащих материалов

Россия продолжает оставаться основным производителем хризотила. Так, в 2023 г. было произведено 598 000 т хризотила [18]. На внутреннем рынке нашей страны используется около 30 % от данного объема производства, более 70 % экспортируется в страны СНГ и во многие другие страны мира. Добыча хризотила в России и Республике Казахстан составляет 79 % от мирового уровня. Добыча хризотила в мире составляет более 98 % от общемирового производства асбестов [19].

Внутренний рынок потребления хризотила (Россия, Казахстан) составляет 90 % и направлен на производство хризотилцементных изделий, из этого количества: 60 % составляет выпуск волнистых листов, труб – 20 %, плоских листов и сайдинга – 15 %, коробов, муфт, желобов – 5 % (рис. 3).

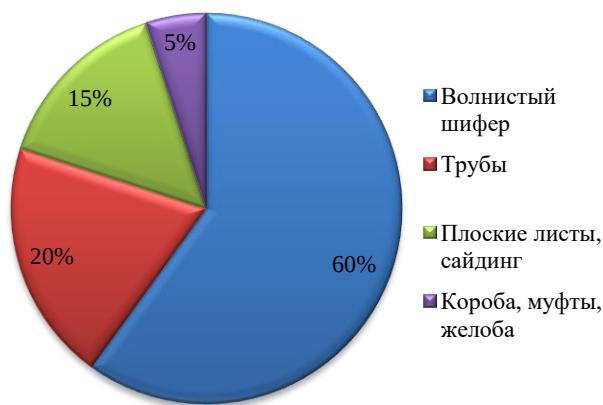


Рис. 3. Внутренний рынок потребления хризотила

Fig. 3. Chrysotile consumption in Russia

Хризотилевая промышленность СНГ насчитывает 43 предприятия, причем значительная часть хризотилдобывающих и хризотилцементных предприятий является градообразующей. Общее количество граждан СНГ, непосредственно связанных с хризотилевой отраслью, составляет более 500 000 чел. [20].

В 2024 г. Российская Федерация показала рост производства хризотила в размере 3,8 %, или 620 600 т, в реальном отношении (рис. 4).

На мировом рынке Россия является крупнейшим экспортером хризотила в такие страны, как Китай, Вьетнам, Индия, а также Юго-Восточную Азию. В последние годы рынок хризотилового асбеста демонстрирует стабильность – несмотря на изменения внешней конъюнктуры, появление новых ограничений, хризотил остается востребованным мировой экономикой.

В настоящее время на территории нашей страны работает 12 предприятий по производству различных видов хризотилцементных изделий. На территориях России и СНГ находятся три месторождения хризотилового асбеста: в России – самое масштабное в мире – Баженовское (ПАО «Ураласбест»), Кiemбаевское (ОАО «Оренбургские минералы»); в Казахстане – Джетыгаринское (АО «Костанайские минералы»). Суммарная добыча хризотила на данных предприятиях составляет 79,0 % от общемировых объемов добываемого сырья [20].

Анализ объемов продаж хризотилцементных листов, произведенных отечественными предприятиями (рис. 5), характеризует снижение экспорта продукции за рубеж и выравнивание количества продаваемой продукции на отечественном рынке.

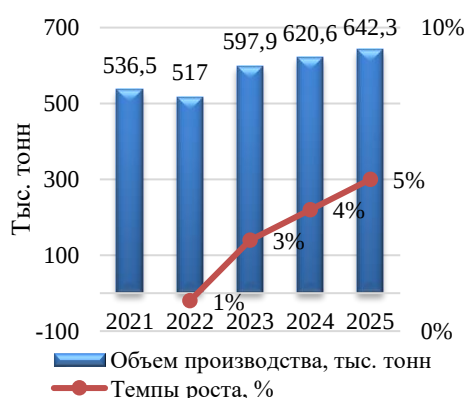


Рис. 4. Объем производства хризотила в России в 2021–2025 гг. (%)

Fig. 4. Chrysotile production (%) in Russia in 2021–2025

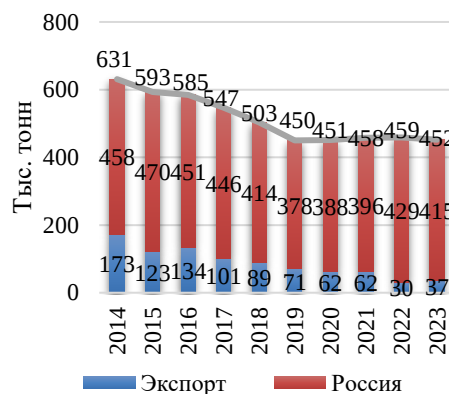


Рис. 5. Объем продаж хризотилцементных листов, муп (миллион условных плиток)

Fig. 5. Chrysotile cement sheets (one million standard tiles)

Характеристики волокон хризотила, используемых в производстве хризотилцементных изделий

В соответствии с ГОСТ 12871–2013¹ хризотилвые волокна, в зависимости от длины волокна, делят на восемь групп, при этом в производстве хризотил-

¹ ГОСТ 12871–2013. Хризотил. Общие технические условия: введ. 2015-07.01. Москва: Стандартинформ, 2015. 24 с.

тилцементных изделий используют хризотил 3–6 групп. Длина волокон в зависимости от группы может составлять от долей до 10 мм.

При добыче и обогащении хризотилитовых руд изменяются качественные показатели хризотилового волокна. Волокно хризотила нормальной прочности характеризуется механической прочностью на разрыв 2800–3600 МПа, полумомкого – 1900–3000 МПа и ломкого – 1700–2200 МПа. Ломкий хризотил отличается повышенной сорбционной способностью. Деформированные волокна хризотила имеют пониженную прочность. Невысокой прочностью обладает выветрелый хризотил, который называют хризотилом пониженной прочности. Понижение сопротивления на разрыв такого хризотила связано с процессами метаморфизма асбестизированных ультрамафитов за счет их карбонатизации [5, 21–23].

В производстве хризотилсодержащей продукции используют различные группы и марки хризотила. ГОСТ 12871–2013 определяет следующие категории: агрегаты хризотила с недеформированными волокнами, толщина которых менее 1 мм; гáля – размер частиц волокна и породы не менее 0,4 мм и не более 4,8 мм, пыль – размер частиц волокна и породы менее 0,4 мм. В зависимости от длины волокна хризотил делят на группы с 0 до 6К и 7. Хризотил 0–6 групп и 6К делится на марки в зависимости от фракционного состава.

Длинноволокнистый хризотил 0–2 групп используют для получения пряжи и ткани, из которых шьют защитные огнестойкие костюмы, брезенты, противопожарные занавеси, палладированные и платинированные асбесты, которые используются в качестве катализаторов в химических производствах.

Хризотил 3-й и 4-й групп используют в производстве напорных и безнапорных труб для водопровода и канализации, муфт, фундаментных блоков и т. д. Хризотил 5-й и 6-й групп применяют в производстве листов: волнистых – окрашенных и неокрашенных; плоских – прессованных и непрессованных, фасадных плит, конструкционных, электро-, тепло-, звукоизоляционных изделий. Хризотил 6К и 7 групп находят применение в производстве огнеупорных красок, хризотиловой штукатурки, теплоизоляционных смесей, шпал, хризотил-битумных смесей [5, 24].

Анализ результатов экспериментальных исследований структурных изменений волокон хризотила при различных способах обработки

В производстве хризотилцементных изделий важной технологической операцией является процесс подготовки исходного хризотилового волокна, который заключается в его распушке с использованием бегунов и гидропушителя. Обработка хризотила в бегуне направлена на ослабление агрегативной связности волокон между собой и на достижение максимума активной поверхности. Сущность данного процесса заключается в том, чтобы расщепить между собой элементарные фибриллы в пучке, разделить пучки на более тонкие разновидности по плоскостям с нарушенной спайностью. Формирование вторичной структуры волокна происходит за счет коагуляции тонкодисперсных частиц уже в турбулентном водном потоке гидропушителя с целью увеличения их адсорбционной поверхности. Для использования волокон хризотил-асбеста

в производстве цементосодержащих и полимерсодержащих материалов необходим подход с использованием разных способов их модифицирования.

Условно способы модификации волокон хризотила можно разделить на следующие группы: механическая обработка (рис. 6), химическая обработка за счет воздействия кислот (рис. 7), термическая обработка (рис. 8, 9), комбинированные методы (рис. 10, 11).



Рис. 6. Способы механической обработки хризотила
Fig. 6. Flow-chart of chrysotile mechanical processing

К способам механической обработки материала относится измельчение хризотила за счет разрыва волокон при различных условиях обработки (рис. 6). Так, если рассматривать двухступенчатое диспергирование [25], помол товарного хризотила предварительно происходит в диспергаторе, после чего расщепление пучков проводят в кавитационном дисмембраторе за счет высокоэнергетической пульсации давления ультразвуковой частоты. Полученное таким способом наноразмерное волокно можно использовать для армирования композиционных материалов. Трехступенчатое диспергирование в вибрационной мельнице позволяет получить как тонкие волокна хризотила диаметром 0,1 мкм, так и плотные агрегаты разных размеров с поперечным размером частиц 0,05–0,1 мкм [26]. Криогенное измельчение с использованием жидкого азота при помоле в течение 40 мин дает возможность снизить длину волокон хризотила до 5 мкм [27].

Ввиду того что хризотил является волокнистым силикатным минералом, при термической обработке происходит выделение кремнийсодержащих продуктов (рис. 7).

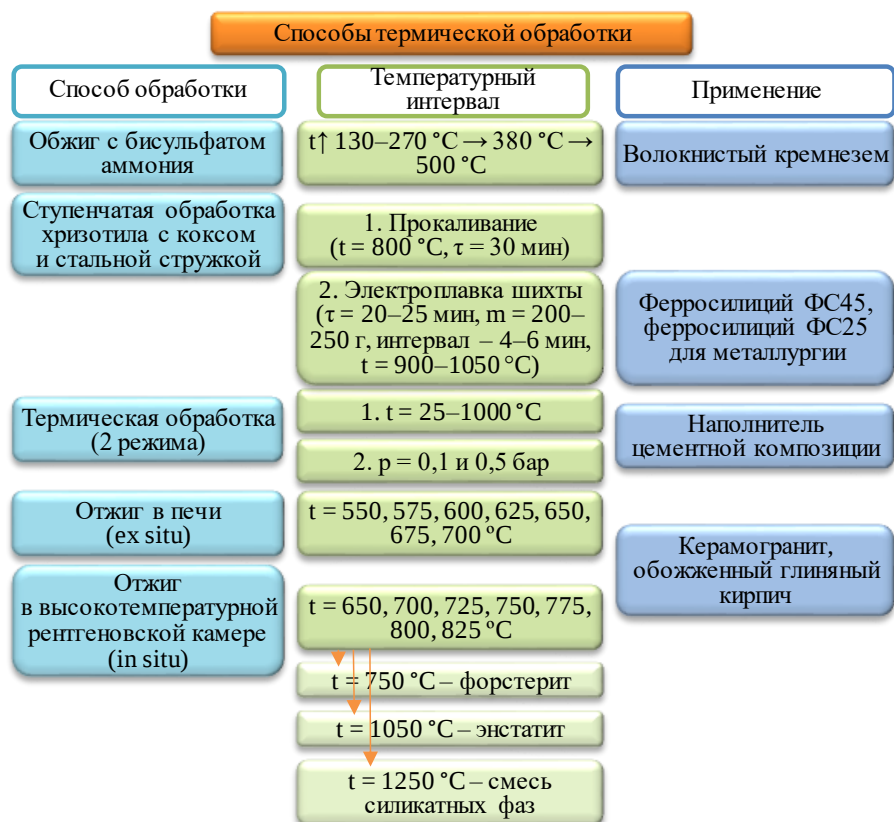


Рис. 7. Способы термической обработки хризотила

Fig. 7. Flow-chart of chrysotile heat treatment

Так, при обжиге в присутствии бисульфата аммония [28] при температуре около $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ промежуточный продукт $(\text{NH}_4)_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_3$ превращается в MgSO_4 , а тетраэдр Si-O рекомбинирует, в результате чего получают волокнистый кремнезем, используемый в строительстве в качестве теплоизоляционного материала.

Ступенчатая высокотемпературная обработка хризотила в композиции с коксом и стальной стружкой позволяет получить ферросилиций марки ФС45 и ферросилиций марки ФС25 со степенью извлечения кремния от 75 до 85,4 % и от 68,6 до 73,8 % соответственно, который предназначен для использования в металлургии для улучшения механических свойств сплавов, повышения коррозионно- и жаростойкости [29]. При модификации хризотила в двух режимах обработки: в диапазоне температур $25-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ при обычных параметрах и при пониженном давлении (0,1 и 0,5 бар) формируется продукт, используемый в качестве наполнителя цементной композиции [30]. Если рассматривать обработку хризотилового волокна двумя методами ex-situ и in-situ, можно отметить, что при высокотемпературной обработке происходит разложение хризотила с образованием силикатов, применяемых в качестве сырья для получения керамогранита (porcellanato grés) или обожженного глиняного кирпича [31].

Химические способы обработки хризотила в основном направлены на модификацию структуры и свойств волокна, его верхнего слоя (рис. 8, 9). Повышению степени распушки хризотила способствует его обработка водным раствором таких кислот, как соляная, уксусная, кремнефтористая и серная [32].

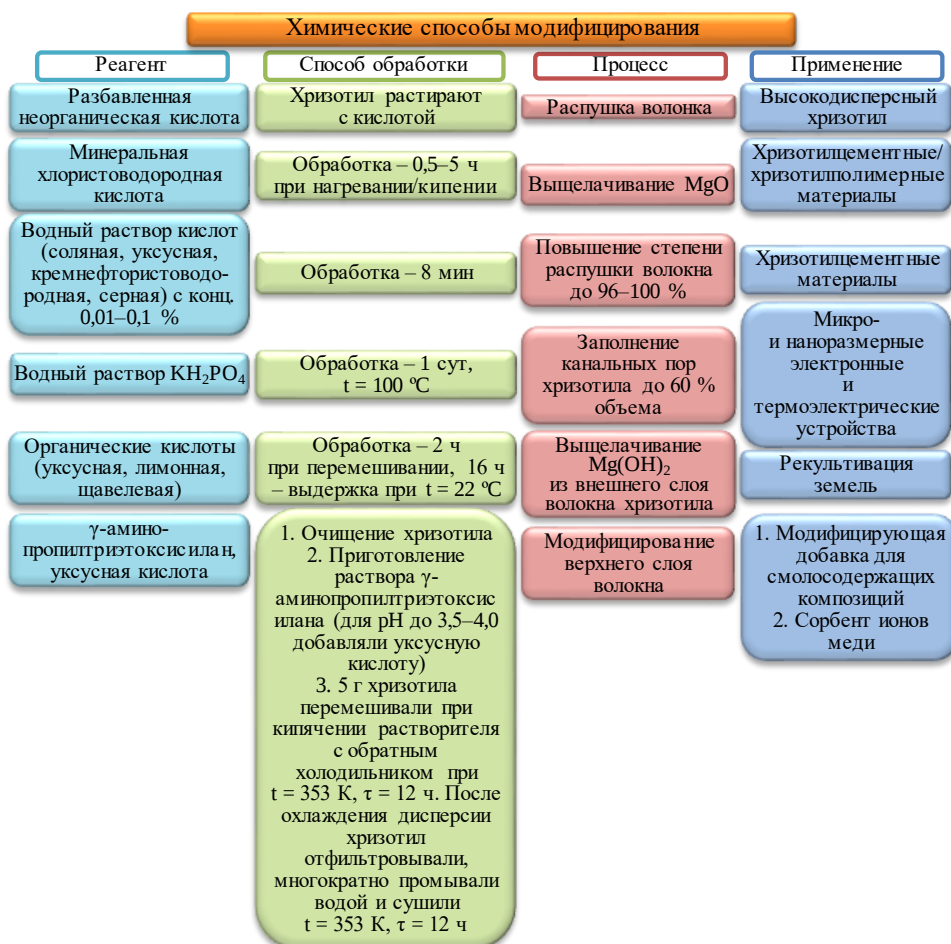


Рис. 8. Химические способы модифицирования хризотила
Fig. 8. Flow-chart of chemical modification of chrysotile

Использование в качестве реагента серной кислоты при обработке товарного хризотила и добавление жидкого стекла при распушке волокон также способствуют данному процессу [33–36]. Выщелачивание оксида магния из верхнего слоя хризотилового волокна происходит при его обработке минеральной хлористоводородной кислотой [37, 38] и органическими кислотами [39], после чего его можно использовать в производстве хризотилцементных материалов и для рекультивации земель соответственно. Также после модификации верхнего слоя хризотила его можно применять в качестве сорбционного материала. Для этого могут быть использованы следующие реагенты: γ -аминопропилтри-

этоксисилан и уксусная кислота [40], нитрат железа(III) нонагидрат [41], соляная [42] и азотная [43] кислоты. Обработка волокна дигидроортофосфатом калия [44] и соляной кислотой позволяет применять модифицированный хризотил на микро- и наноуровне. При растирании хризотилового волокна с добавлением разбавленной неорганической кислоты получают высокодисперсный хризотил [45].

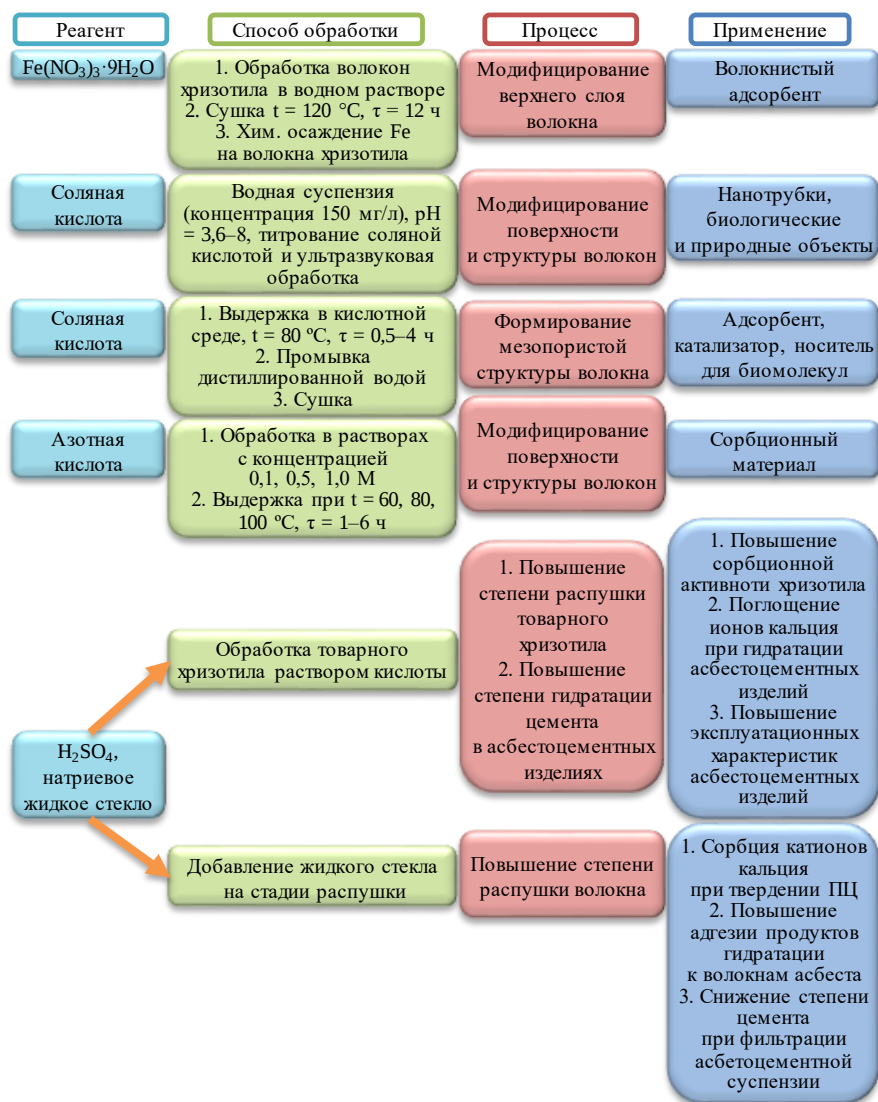


Рис. 9. Способы химической обработки хризотила

Fig. 9. Flow-chart of chrysotile chemical processing

Комбинированные способы обработки хризотилового волокна могут включать этапы механической, химической и термической обработки, микро-волнового излучения и ультразвукового воздействия (рис. 10, 11).

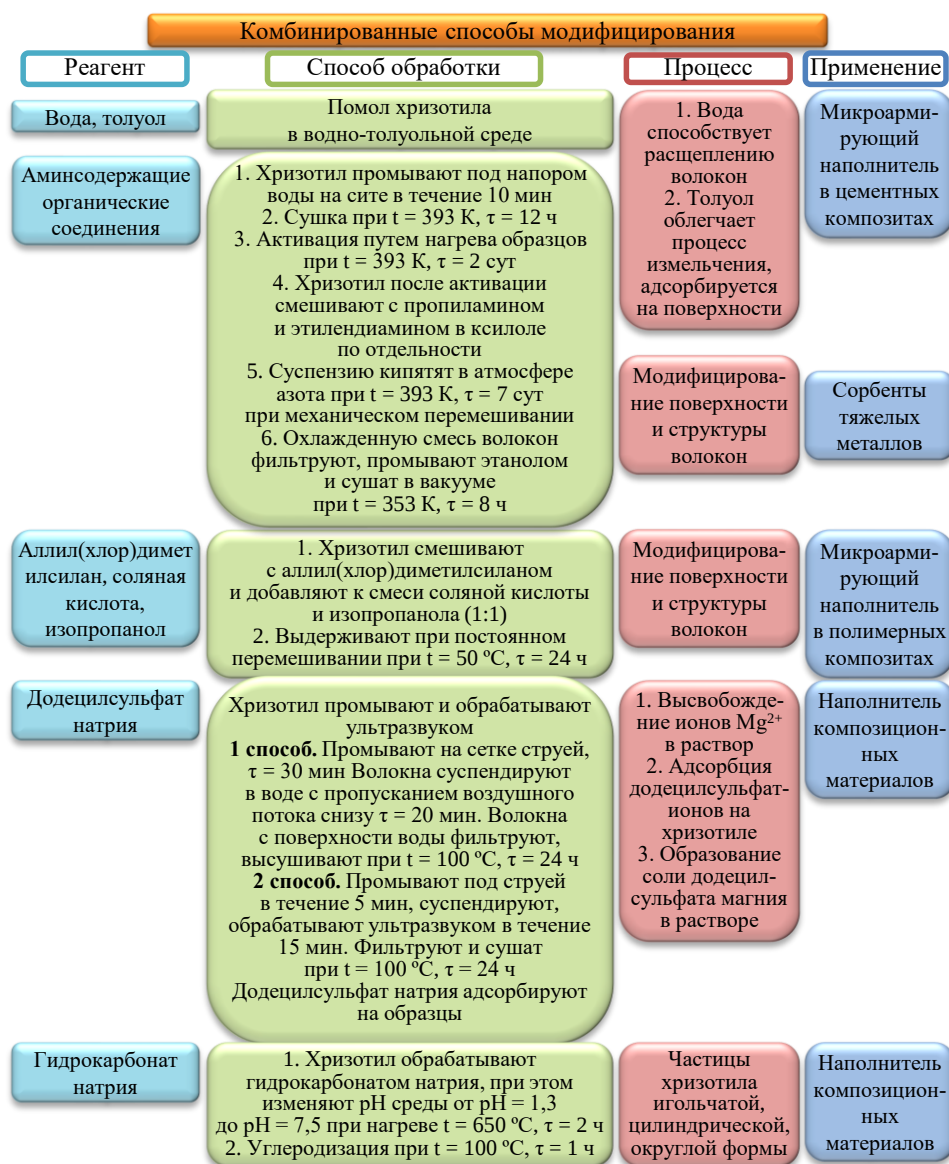


Рис. 10. Комбинированные способы модифицирования хризотила

Fig. 10. Flow-chart of combined modification of chrysotile

Если рассматривать модификацию хризотила путем воздействия кислот при повышенных температурах, то можно отметить, что при использовании в качестве реагента аминсодержащих органических соединений [46] за счет модификации поверхности и структуры хризотилового волокна можно получить сорбенты тяжелых металлов. Также для получения сорбентов проводят обработку хризотила фосфорной кислотой с последующей термической обработкой [47]. В то же время при использовании в качестве реагента солей фосфорной кислоты после смешения компонентов и фильтрации смеси в качестве

модификации хризотила отмечают образование струвита и силикатных солей, применяемых как лимоннокислое удобрение [48].

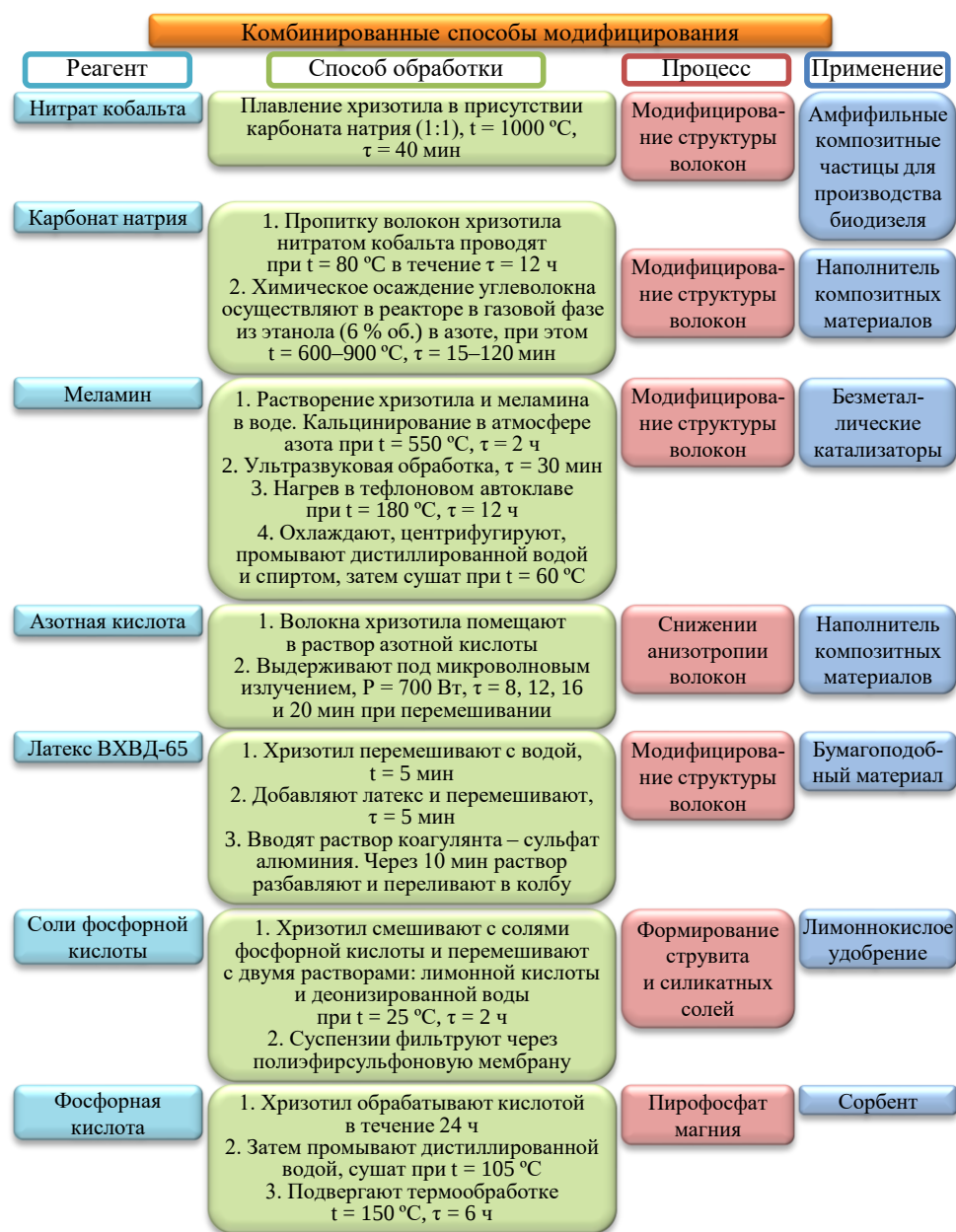


Рис. 11. Комбинированные способы обработки хризотила

Fig. 11. Flow-chart of combined chrysotile processing

При обработке волокон гидрокарбонатом натрия [49] и карбонатом натрия [50] после модификации структуры волокон и изменения формы частиц

хризотил может быть использован в качестве наполнителя различных композиционных материалов. Пропитка волокон раствором нитрата кобальта при повышенной температуре с последующим химическим осаждением на него углеволокна дает возможность получить композитные частицы, применяемые на различных стадиях производства биодизеля [51].

Перемешивание хризотила в водно-полимерной среде воздействует на структуру его волокна. Помол и, соответственно, перемешивание волокна в водно-толуольной среде способствуют расщеплению волокон, а также при измельчении толуол осаждается на поверхности хризотила, что при использовании обработанного таким способом волокна в цементных композитах позволяет избежать образования трещин [52]. После обработки волокна сополимером винилхлорида с винилиденхлоридом, что и является латексом марки ВХВД-65, можно получить бумагоподобный материал [53].

Модификация хризотила при использовании меланина дает возможность получить безметаллические катализаторы [54]. А при выборе таких реагентов, как додецилсульфат натрия [55] и азотная кислота [56], модифицированный хризотил применяют в качестве наполнителя композиционных материалов. При обработке кремнийорганическими соединениями (например, аллил(хлор)диметилсиланом), а также растворами соляной кислоты и изопропанола после изменения поверхности и структуры волокон их используют как армирующий наполнитель в полимерных композитах [57].

Также интерес представляет воздействие на структуру волокон хризотила кислот, получаемых за счет выращивания в их присутствии грибов штамма *Talaromyces* sp., выделенного из серпентиновых почв в Китае [58]. Однако однозначного мнения на этот счет нет. В ходе абиотического исследования с целью имитации изменения рН раствора для выдержки хризотила за счет добавления соляной кислоты было установлено, что скорости химического выветривания хризотила были практически идентичными независимо от того, было ли растворение вызвано биологически или абиотически. При этом рентгеноструктурный анализ и анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии волокон хризотила не показали структурных изменений.

Заключение

В настоящее время применение хризотилцементных материалов в строительной индустрии заметно снизилось, что чаще всего связано с экологическим аспектом технологии производства данного материала. Однако в ходе изучения проведенных исследований установлено, что канцерогенными свойствами обладают лишь определенные разновидности микроскопических волокон асбеста, а именно амфиболы. Если говорить о хризотиле, то такие волокна не только безопасны при соблюдении всех необходимых мер предосторожности на производстве, но и не имеют аналогов по своим физико-механическим характеристикам в сравнении с искусственными заменителями.

Также проведенный анализ публикаций позволил условно классифицировать способы модификации хризотила по параметрам обработки волокна. Так, механическая обработка позволяет влиять на текстуру волокна, изменяя диаметр и длину фибрилл. При термическом воздействии на волокна хризотила

отмечено выделение кремнийсодержащих продуктов, что расширяет область его применения не только для производства хризотилцементных материалов, но и в металлургической промышленности. Способы химической модификации хризотила основаны на обработке волокон кислотами, также могут быть использованы натриевое жидкое стекло и кремнийорганические жидкости. Преобразованные такими способами волокна имеют еще больший спектр возможностей и находят применение в качестве адсорбентов, для хризотилцементных материалов, для микро- и наноустройств. Комбинированные способы обработки в зависимости от регулируемых параметров дают возможность получить наполнители композиционных материалов, сорбенты, катализаторы, армирующие наполнители для полимерных материалов.

Таким образом, проведенный анализ публикаций по способам обработки и модифицирования хризотила свидетельствует о возможности его использования не только в строительной области, но и в других направлениях промышленности при производстве различных композиционных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Калинин, Д.В., Денискина, Н.Д., Лохова, Г.Г. Амфиболовые асбесты, их синтез и генезис в природе. Новосибирск : Наука, 1975. 93 с.
2. Кужварт, М. Неметаллические полезные ископаемые. Москва : Мир, 1986. 472 с.
3. Янин, Е.П. Асбест в окружающей среде. Москва : ИМГРЭ, 1997. 176 с.
4. Соболев, Н.Д. Введение в асбестоведение. Москва : Недра, 1971. 280 с.
5. Соболева, М.В. Минералогия волокнистых минералов группы амфиболов и серпентина. Москва : Недра, 1972. 252 с.
6. Berry, G. Models for mesothelioma incidence following exposure to fibers in terms of timing and duration of exposure and the biopersistence of the fibers // *Inhal Toxicol.* 1999. V. 11. P. 111–130. DOI: 10.1080/089583799197203
7. Кашанский, С.В. Нормативно-правовое обеспечение безопасного, контролируемого использования асбеста в Российской Федерации // Современное состояние и перспективы развития асбестоцементной промышленности стран СНГ Центрально-Азиатского региона в условиях контролируемого, безопасного использования асбестосодержащих изделий и материалов : Региональный международный семинар. Ташкент, 2004. С. 65–69.
8. Stanton, M.F., Layard, M., Tegeris, A., Miller, E., May, M., Morgan, E., Smith, A. Relation of particle dimension to carcinogenicity in amphibole asbestoses and other fibrous minerals // *Journal of the National Cancer Institute.* 1981. V. 67. P. 965–975.
9. Velasco-García, M.I., Cruz, M.J., Diego, C., Montero, M.A. First identification of pulmonary asbestos fibres in a Spanish population // *Lung.* 2017. V. 195. P. 671–677. DOI: 10.1007/s00408-017-0042-1
10. Gilham, C., Rake, C., Burdett, G. Pleural mesothelioma and lung cancer risks in relation to occupational history and asbestos lung burden // *Occupational and Environmental Medicine.* 2016. V. 73. P. 290–299. DOI: 10.1136/oemed-2015-103074
11. Gerde, P., Scolander, P. Absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on asbestos and man-made mineral fibers in the gas phase // *Non-occupational Exposure to Mineral Fibers: IARC Scientific Publications.* 1989. № 90. P. 140–148. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)85341-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)85341-4)
12. Блох, Г.С., Парыгин, В.П., Долинская, Г.С. Заменители асбеста в производстве листовых композиционных материалов // *Строительные материалы.* 1992. № 8. С. 16–18.
13. Гиббз, Г. Мониторинг охраны здоровья и безопасность при использовании других волокнистых материалов // Безопасность и здоровье при производстве и использовании асбеста и других волокнистых материалов : сборник докладов и выступлений Международной конференции, Екатеринбург, 3–7 июня 2002 г. Асбест : Асбестовая ассоциация, 2003. С. 30–38.
14. Готбу, К. Запрет асбеста связан не с радением о здоровье – это экономическая война // Безопасность и здоровье при производстве и использовании асбеста и других волокни-

- стных материалов : сборник докладов и выступлений Международной конференции, Екатеринбург, 3–7 июня 2002 г. Асбест : Асбестовая ассоциация, 2003. С. 24–25.
15. *Новейшие исследования по теме «Асбест и здоровье»* // Урал Асбест : [сайт]. URL: <https://www.uralasbest.ru/health/novejshie-issledovaniya-po-teme-asbest-i-zdorove> (дата обращения: 21.04.2026).
 16. *C162 Asbestos Convention, 1986* // International Labour Organization : [сайт]. URL: https://training.ilo.org/actrav_cdrom2/en/osh/legis/c162.htm (дата обращения: 21.04.2026).
 17. *Pigg, D. Regulatory developments – Situation in the United States* // Proceedings of the 8th Asbestos International Association Biennial Conference, 11–12 May 1993. P. 36–43.
 18. *Пуненков, С.Е., Козлов, Ю.С.* Хризотил-асбест и ресурсосбережение в хризотил-асбестовой отрасли // Горный журнал Казахстана. 2022. № 1. С. 5–10. DOI: 10.48498/minmag.2022.202.2.001
 19. *Punenkov, S.E.* Composite materials based on natural chrysotile fibers // Chemical Bulletin. 2024. V. 7. № 1. P. 4–21. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-1-4-21
 20. *Пуненков, С.Е.* Хризотилвые волокна и хризотилцементные изделия на их основе // Горный журнал Казахстана. 2024. № 2. С. 12–25. <https://doi.org/10.48498/minmag.2024.226.2.006>
 21. *Месторождения хризотил-асбеста СССР*. Москва : Недра, 1967. 512 с.
 22. *Меренков, Б.Я.* Генезис хризотил-асбеста. Москва : Изд-во АН СССР, 1958. 138 с.
 23. *Меренков, Б.Я., Толстихина, К.И., Шумихина, И.В.* Дегидратация хризотил-асбеста и серпофита // Труды ИГЕМ АН СССР. 1959. Вып. 31. С. 54–67.
 24. *Татаринев, П.М., Карякин, А.Е., Голиков, А.С., Кирюков, В.В., Дыбков, В.Ф.* Курс месторождений твердых полезных ископаемых. Ленинград : Недра, 1975. 631 с.
 25. *Смоликов, А.А., Костин, В.В.* Применение высокоэнергетического диспергирования для получения нанотрубок хризотила // Известия вузов. Строительство. 2009. № 2. С. 24–30. EDN: PFALPD
 26. *Кротилов, В.А., Харитонов, Н.П.* Изучение процессов, происходящих при механохимическом воздействии на полиорганосилоксан-силикатные суспензии // Труды 6-го Всесоюзного совещания по жаростойким покрытиям, Ленинград, 20–23 марта 1973 г. Ленинград : Наука, 1975. С. 374–383.
 27. *Scognamiglio, V., Di Giuseppe, D., Lassinantti Gualtieri, M., Tomassetti, L., Gualtieri, A.F.* A Systematic Study of the Cryogenic Milling of Chrysotile Asbestos // Applied Sciences. 2021. V. 11. № 11. Art. 4826. DOI: 10.3390/app11114826
 28. *Song, P., Peng, T., Sun, H., Yu, Y.* Preparation of fibri-form silica via extraction of metal oxide by mix-roasting from chrysotile fibers // Journal of the Chinese Ceramic Society. 2015. V. 43. № 5. P. 692–698. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2015.05.20
 29. *Akylbekov, Ye.Ye., Shevko, V.M., Aitkulov, D.K., Karataeva, G.E.* Electrothermal processing of chrysotile-asbestos wastes with production of ferroalloy and extraction of magnesium into the gas phase // Complex Use of Mineral Resources. 2023. V. 327. № 4. P. 74–81. DOI: 10.31643/2023/6445.42
 30. *Kujawa, M., Kusiorowski, R., Gerle, A.* The influence of conventional and low-pressure heat treatment on the course of chrysotile asbestos decomposition // 24th SGEM International Multidisciplinary Scientific Geoconference 2024 : conference proceedings. DOI: 10.5593/sgem2024v/4.2/s17.21
 31. *Kusiorowski, R., Gerle, A., Kujawa, M., Bloise, A.* Kinetic aspects of chrysotile asbestos thermal decomposition process // Minerals. 2025. V. 15. № 6. P. 609. DOI: 10.3390/min15060609
 32. *Патент № 1620432 СССР, МПК C04B 20/08.* Способ распушки асбеста ; заявл. 06.02.1989 ; опубл. 15.01.1991 / Мещеряков Ю.Г., Чистяков Б.З., Балакирева Е.К. Бюл. № 2. 2 с.
 33. *Везенцев, А.И., Наумова, Л.Н.* Повышение эффективности распушки хризотила // Строительные материалы. 2008. № 9. С. 21–22.
 34. *Турский, В.В., Везенцев, А.И., Наумова, Л.Н., Чупрова, Ю.И., Сидорова, Н.Ю.* Интенсификация распушки хризотил-асбеста // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2001. № 9. С. 55–57.
 35. *Наумова, Л.Н.* Структурно-морфологические изменения характеристик хризотила под действием модифицирующих факторов // Казанская наука. 2010. № 10. С. 55–57.
 36. *Наумова, Л.Н.* Повышение физико-механических характеристик цементного композиционного материала на основе модифицированного волокна хризотила // Вестник Белгород-

- ского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2025. № 8. С. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-8-17
37. *Патент № 454151* Швейцарии, МПК C03B 33/00. Procédé de préparation d'une matière colloïdale microcristalline à partir du chrysotile : опубли. 29.07.1969 / Battista O.A. 31 с.
 38. *Патент № 3458393* США, МПК D31B, C03B. Modified colloidal chrysotile and method of preparing same : опубли. 07.07.1972 / Battista O.A. 6 с.
 39. Holmes, E.P., Wilson, J., Schreier, H., Lavkulich, L.M. Processes affecting surface and chemical properties of chrysotile: Implications for reclamation of asbestos in the natural environment // Canadian Journal of Soil Science. 2012. V. 92. P. 229–242. DOI: 10.4141/CJSS2010-014
 40. Liu, K., Zhu, B., Feng, Q., Wang, Q. Adsorption of Cu(II) ions from aqueous solutions on modified chrysotile: Thermodynamic and kinetic studies // Applied Clay Science. 2013. V. 80–81. P. 38–45. DOI:10.1016/j.clay.2013.05.014
 41. Teixeira, A.P.C., Purceno, A.D., de Paula, C.C.A., da Silva, J.C.C. Efficient and versatile fibrous adsorbent based on magnetic amphiphilic composites of chrysotile/carbon nanostructures for the removal of ethynilestradiol // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 248–249. № 1. P. 295–302. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.014
 42. Maletaškić, J., Stanković, N., Daneu, N., Babić, B., Stoiljković, M., Yoshida, K., Matović, B. Acid leaching of natural chrysotile asbestos to mesoporous silica fiber // Physics and Chemistry of Minerals. 2018. V. 45. P. 343–351. DOI: 10.1007/s00269-017-0924-z
 43. Hongo, T., Fukuda, S. Transmission electron microscopy and fourier-transform infrared spectroscopy studies of chrysotile dissolution using a flow-through method // Clay Science. 2023. V. 27. P. 41–48. <https://doi.org/10.11362/jcssjclayscience.MS-23-1>
 44. Кумзеров, Ю.А., Картенко, Н.Ф., Парфеньева, Л.С., Смирнов, И.А., Фокин, А.В., Wlosewicz, D., Misiolek, H., Jezowski, A. Теплоемкость и теплопроводность нанокompозита хризотил-КДР (KH₂PO₄) // Физика твердого тела. 2011. Т. 53. № 5. С. 1033–1036.
 45. *Патент № 3201196* США. Chrysotile with high specific surface and method of preparing same : опубли. 17.08.1965 / Janey A.B. 87 с.
 46. Fonseca, M.G., Airolidi, C. Thermodynamics data of interaction of copper nitrate with native and modified chrysotile fibers in aqueous solution // Journal of Colloid and Interface Science. 2001. V. 240. № 1. P. 229–236. DOI: 10.1006/jcis.2001.7581
 47. Girotto, C.P., de Campos, S.D., de Campos, E.A. Chrysotile asbestos treated with phosphoric acid as an adsorbent for ammonia nitrogen // Heliyon. 2020. V. 6. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03397
 48. Tan, Y., Zou, Z., Qu, J. Mechanochemical conversion of chrysotile asbestos tailing into struvite for full elements utilization as citric-acid soluble fertilizer // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 283. Art. 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637
 49. Ryu, K.W., Chae, S.C., Jang, Y.N. Carbonation of chrysotile under subcritical conditions // Materials Transactions. 2011. V. 52. № 10. P. 1983–1988.
 50. Arynov, K., Auyeshov, A., Yeskibayeva, Ch., Ibrayeva, M., Auyeshov, D. Study of products of fusion of chrysotile asbestos production magnesia wastes and alkaline agents // Industrial Technology and Engineering. 2016. V. 4. № 21. P. 26–33. EDN: XSPRXX
 51. Teixeira, A.P.C., Purceno, A.D., Barros, A.S., Lemos, B.R.S. Amphiphilic magnetic composites based on layered vermiculite and fibrous chrysotile with carbon nanostructures: Application in catalysis // Catalysis Today. 2012. V. 190. № 1. P. 133–143. DOI: 10.1016/j.cattod.2012.01.042
 52. Papirer, E., Donnet, J.B., Roland, P. Comminution of asbestos: Role of the liquids used as grinding aids // Microscopic Aspects of Adhesion and Lubrication: proceedings. Amsterdam, 1982. P. 449–457.
 53. Мальцев, Г.И., Юрьев, Ю.Л. Применение винил- и винилиден-хлоридных латексов при изготовлении асбестового картона // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 1 (53). С. 151–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9
 54. Macher, G.Z., Károly, F., Sung, C.T.B., Beke, D., Torma, A., Gergely, S. Spectroscopic analysis of chrysotile asbestos and its environmental resistance in asbestos cement waste products // Pertanika Journal of Science and Technology. 2024. V. 32. № 6. P. 2441–2458. DOI: 10.47836/pjst.32.6.03
 55. Valentim, I.B., Joekes, I. Adsorption of sodium dodecylsulfate on chrysotile // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2006. V. 290. № 1–3. P. 106–111. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.05.009

56. Essih, S., Pardo, L., Cecilia, J.A., dos Santos-Gómez, L., Colodrero, R.M.P., Franco, F. Micro-wave assisted acid treatment for the mineral transformation of chrysotile as an alternative for asbestos waste management // *Environmental Geochemistry and Health*. 2024. V. 46. P. 332. DOI: 10.1007/s10653-024-01993-6
57. van Meerbeek, V., van der Hitzky, R. Mechanism of the grafting of organosilanes on mineral surfaces II. Secondary reaction during the grafting of alkenylchlorosilanes // *Colloid and Polymer Science*. 1979. V. 257. P. 178–181. <https://doi.org/10.1007/BF01638145>
58. Fowler, A., Santelli, C., Teng, H. Fungi induced chemical weathering of asbestiform chrysotile // GSA Annual Meeting 2015: conference abstracts, Baltimore, Maryland, USA. 2015.

REFERENCES

1. Kalinin, D.V., Deniskina, N.D., Lokhova, G.G. Amphibole Asbestos, their Synthesis and Genesis in Nature. Novosibirsk: Nauka, 1975. 93 p. (In Russian)
2. Kuzhvar, M. Non-metallic Mineral Resources. Moscow: Mir, 1986. 472 p. (Russian translation)
3. Yanin, E.P. Asbestos in the Environment. Moscow: IMGRE, 1997. 176 p. (In Russian)
4. Sobolev, N.D. Introduction to asbestos science. Moscow: Nedra, 1971. 280 p. (In Russian)
5. Soboleva, M.V. Mineralogy of Fibrous Minerals of Amphibole and Serpentine Groups. Moscow: Nedra, 1972. 252 p. (In Russian)
6. Berry, G. Models of the Incidence of Mesothelioma after Fiber Exposure in Terms of Time and Duration of Exposure, as Well as Fiber Bio-resistance. *Inhalation Toxicology*. 1999; 11: 111–130.
7. Kashansky, S.V. Regulatory and Legal Support for the Safe, Controlled Use of Asbestos in the Russian Federation. In: *Proc. Regional Int. Workshop 'The Current State and Future Prospects of the Asbestos-Cement Industry in CIS Countries of Central Asia in the Context of Controlled and Safe Use of Asbestos-Containing Products and Materials'*. Tashkent, 2004. Pp. 65–70. (In Russian)
8. Stanton, M.F., Layard, M., Tegeris, A., et al. The Relationship of Particle Size with Carcinogenicity of Amphibole Asbestos and Other Fibrous Minerals. *Journal of the National Cancer Institute*. 1981; 67: 965–975.
9. Velasco-Garcia, M.I., Cruz, M.J., Diego, S., et al. The First Detection of Pulmonary Asbestos Fibers in the Spanish Population. *Lung*. 2017; 195: 671–677. DOI: 10.1007/s00408-017-0042-1
10. Gilham, K., Rake, K., Burdett, G. Risks of Pleural Mesothelioma and Lung Cancer Depending on Occupational History and Lung Load Associated with Asbestos. *Occupational and Environmental Medicine*. 2016; 73: 290–299. DOI: 10.1136/oemed-2015-103074
11. Gerde, P., Skolander, P. Absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons on synthetic and artificial mineral fibers in the gas phase. In: *Nonprofessional Effects on Mineral Fibers: IARC Scientific Publication No. 90*. Lyon: IARC, 1989. Pp. 140–148.
12. Bloch, G.S., Parygin, V.P., Dolinskaya, G.S. Substitutes for Asbestos in the Production of Sheet Composite Materials. *Stroitel'nye materialy*. 1992; (8): 16–18. (In Russian)
13. Gibbs, G. Monitoring of Health Protection and Safety in using Other Fibrous Materials. In: *Proc. Int. Conf. 'Safety and Health in the Production and Use of Asbestos and Other Fibrous Materials'*, Yekaterinburg, 2002. Pp. 30–38. (In Russian)
14. Gotbu, K. Prohibition of Asbestos is not Related to Health Concerns – it is Economic. The Sky War. In: *Proc. Int. Conf. 'Safety and Health in the Production and Use of Asbestos and Other Fibrous Materials'*, Edinburgh, 2002. Pp. 24–25.
15. The latest research on “Asbestos and health”. Available: www.uralasbest.ru/health/novejshie-issledovaniya-po-teme-asbest-i-zdorove (accessed April 21, 2026). (In Russian)
16. C162 Asbestos Convention, 1986. International Labour Organization. Available: https://training.ilo.org/actrav_cdrom2/en/osh/legis/c162.htm (accessed April 21, 2026).
17. Pigg, D. Changes in Legislation – the Situation in the United States. In: *Proc. 8th International Association Biennial Conference*. May 11–12, 1993. Pp. 36–43.
18. Kozlov, Yu.S. Chrysotile Asbestos and Resource Conservation in the Chrysotile Asbestos Industry. *Gorny zhurnal Kazakhstana*. 2022; (1): 5–10. (In Russian)
19. Punenkov, S.E. Composite Materials Based on Natural Chrysotile Fibers. *Chemical Bulletin*. 2024; 7(1): 4–21. DOI: 10.58224/2619-0575-2024-7-1-4-21
20. Punenkov, S.E. Chrysotile Fiber and Cement Products Therefrom. *Gorny zhurnal Kazakhstana*. 2024; (2): 12–25. (In Russian)

21. Tatarinov, P.M., Artemov, V.R. (Eds.). Deposits of Chrysotile Asbestos of the USSR. Moscow: Nedra, 1967. 512 p. (In Russian)
22. Merenkov, B.Ya. The Genesis of Chrysotile Asbestos. Moscow, 1958. 138 p. (In Russian)
23. Merenkov, B.Ya., Tolstikhina, K.I., Shumikhina, I.V. Dehydration of Chrysotile Asbestos and Serpentine. *Trudy IGM AN SSSR*. 1959; (31): 54–67. (In Russian)
24. Tatarinov, P.M., Karyakin, A.E., Golikov, A.S., Kiryukov, V.V., Dybkov, V.F. Course of Deposits of Solid Minerals. Leningrad: Nedra, 1975. 631 p. (In Russian)
25. Smolikov, A.A., Kostin, V.V. Application of High-Energy Dispersion for Production of Chrysotile Nanotubes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitelstvo*. 2009; (2): 24–30. EDN: PFALPD (In Russian)
26. Krotikov, V.A., Kharitonov, N.P. Processes During Mechanochemical Action on Polyorganosiloxane-Silicate Suspensions. In: *Proc. 6th All-Union Meeting on Heat-Resistant Coatings*, Leningrad, March 20–23, 1973. Leningrad: Nauka, 1975. Pp. 374–383. (In Russian)
27. Scognamillo, V., Di Giuseppe, D., Lassinanti Gualtieri, M., Tomassetti, L., Gualtieri, A.F. Systematic Investigation of the Cryogenic Grinding of Chrysotile in its Pure Form. *Applied Sciences*. 2021; 11(11): 4826. DOI: 10.3390/app11114826
28. Song, P., Peng, T., Song, H., Yu, Yu. Obtaining Fibrous Silica by Extraction of Metal Oxide by Firing a Mixture of Chrysotile Fibers. *Journal of the Chinese Ceramic Society*. 2015; 43(5): 692–698. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.2015.05.20
29. Akylbekov, Ye.Ye., Shevko, V.M., Aitkulov, D.K., Karataeva, G.E. Electrothermal Processing of Chrysotile Asbestos Waste to Produce a Ferroalloy and Extract Magnesium into the Gas Phase. *Integrated Use of Mineral Resources*. 2023; 327(4): 74–81. DOI: 10.31643/2023/6445.42
30. Kujava, M., Kusiorowski, R., Gerle, A. The Influence of Traditional Heat Treatment and Low-Pressure Heat Treatment on the Decomposition of Chrysotile Asbestos. In: *Proc. 24th Int. Interdiscipl. Sci. Geoconf.* 2024. DOI: 10.5593/sgem2024v/4.2/s17.21
31. Kusiorowski, R., Gerle, A., Kujava, M., Bloise, A. Kinetic Aspects of the Thermal Decomposition of Chrysotile Asbestos. *Minerals*. 2025; 15(6): 609. DOI: 10.3390/min15060609
32. Meshcheryakov, Yu.G., Chistyakov, B.Z., Balakireva, E.K. Method of Fluffing Asbestos. Patent Russ. Fed. N 1620432, 1991. (In Russian)
33. Vezentsev, A.I., Naumova, L.N. Efficiency Improvement of Fluffing Chrysotile. *Stroitel'nye materialy*. 2008; (9): 21–22. (In Russian)
34. Tursky, V.V., Vezentsev, A.I., Naumova, L.N., Chuprova, Yu.I., Sidorova, N.Yu. Intensification of Chrysotile Asbestos Fluff. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Stroitelstvo*. 2001; (9–10): 55–57. (In Russian)
35. Naumova, L.N. Structural and Morphological Changes in Chrysotile under Modifying Factors. *Kazanskaya nauka*. 2010; (10): 55–57. (In Russian)
36. Naumova, L.N. Improving Physical and Mechanical Properties of Cement Composite Based on Modified Chrysotile Fiber. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2025; (8): 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-8-8-17 (In Russian)
37. Battista, O.A. The Process of Preparing Microcrystalline Material from Colloidal Material for Chrysotile. Bulgarian Patent N 454151. 1969. 31 p.
38. Battista, O.A. Modified Colloidal Chrysotile and the Method of its Preparation. US Patent N 3458393A, 1972. 6 p.
39. Holmes, E.P., Wilson, J., Schreier H., Lavkulich, L.M. Processes Affecting the Surface and Chemical Properties of Chrysotile: Implications for the Reclamation of Minerals in the Natural Environment. *Canadian Journal of Soil Science*. 2012; 92: 229–242. DOI: 10.4141/CJSS2010-014
40. Liu, K., et al. Adsorption of Cu(II) Ions from Aqueous Solutions on Modified Chrysotile: Thermodynamic and Kinetic Studies. *Applied Clay Science*. 2013; 80–81: 38–45.
41. Teixeira, A.P. de Carvalho, et al. An Effective and Versatile Fibrous Adsorbent Based on Magnetic Amphiphilic Composites of Chrysotile and Carbon Nanostructures for the Removal of Ethinyl Estradiol. *Journal of Hazardous Materials*. 2013; 248–249(1): 295–302. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.014
42. Maletashkich, J., Stankovich, N., Daneu, N., Babich, B., Stoilkovich, M., Yoshida, K., Matovic, B. Acid Leaching of Natural Chrysotile Asbestos to Produce Mesoporous Silica Fiber. *Physics and Chemistry of Minerals*. 2018; 45: 343–351. DOI: 10.1007/s00269-017-0924-Z

43. Hongo, T., Fukuda S. Studies of Chrysotile Dissolution by Transmission Electron Microscopy and Infrared Spectroscopy with Fourier Transform using the Flow Method. *Clays and Clay Minerals*. 2023; 27: 41–48.
44. Kumzerov, Yu.A., Kartenko, N.F., Parfeneva, L.S., Smirnov, I.A., Fokin, A.V., Wlosewicz, D., Misiolek, H., Jezowski, A. Heat Capacity and Thermal Conductivity of Chrysotile Asbestos Nanocomposite–CDP (KH₂PO₄). *Fizika tverdogo tela*. 2011; 53(5): 1033–1036. (In Russian)
45. Janey, A.B. Chrysotile with a High Specific Surface Area and a Method for its Preparation. US Patent N 3201196. 1965. 87 p.
46. Fonseca, M.G., Airoidi, K. Thermodynamic Data on the Interaction of Copper Nitrate with Native and Modified Chrysotile Fibers in an Aqueous Solution. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001; 240(1): 229–236. DOI: 10.1006/jcis.2001.7581
47. Giroto, K.P., de Campos, S.D., de Campos, E.A. Chrysotile Asbestos Treated with Phosphoric Acid as an Adsorbent of Ammonia Nitrogen. *Heliyon*. 2020; 6: 1–9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03397
48. Tang, Yu., Zou, Z., Ku, J. Mechanochemical Conversion of Chrysotile Asbestos Tailings into Struvite for the Full Use of the Elements as a Fertilizer Soluble in Citric Acid. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 283: 124637. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124637
49. Ryu, K.V., Che, S.S., Chan, Yu.N. Carbonation of Chrysotile under Subcritical Conditions. *Procedia Engineering*. 2011; 52(10): 1983–1988.
50. Arynov, K., Auyeshov, A., Eskibayeva, Ch., Ibraeva, M., Auyeshov, D. Study of Products of Fusion of Chrysotile Asbestos Production Magnesia Wastes and Alkaline Agents. *Industrial Technology and Engineering*. 2016; 4(21): 26–33. EDN: XSPRKX
51. Teixeira, A.P., de Carvalho, et al. Amphiphilic Magnetic Composites based on Layered Vermiculite and Fibrous Chrysotile with Carbon Nanostructures: Application in Catalysis. *Catalysis Today*. 2012; 190(1): 133–143. DOI: 10.1016/j.cattod.2012.01.042
52. Papirer, E., Donnet, J.B., Roland, P. Comminution of asbestos: Role of the liquids used as grinding aids. In: *Microscopic Aspects of Adhesion and Lubrication: proceedings*. Amsterdam: Elsevier, 1982. Pp. 449–457.
53. Maltsev, G.I., Yuriev, Yu.L. Application of Vinyl and Vinylidene Chloride Latexes in the Manufacture of Asbestos Cardboard. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2024; 14(1): 151–169. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/9 (In Russian)
54. Macher, G.Z., Károly, F., Sung, C.T.B., Beke, D., Torma, A., Gergely, S. Spectroscopic Analysis of Chrysotile Asbestos and its Environmental Resistance in Asbestos Cement Waste Products. *Pertanika Journal of Science & Technology*. 2024; 32(6): 2441–2458. DOI: 10.47836/pjst.32.6.03
55. Valentim, I.B., Joekes, I. Adsorption of Sodium Dodecylsulfate on Chrysotile. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006; 290(1–3): 106–111. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2006.05.009
56. Essih, S., Pardo, L., Cecili, a J.A., dos Santos-Gómez, L., Colodrero R.M.P., Franco F. Microwave Assisted Acid Treatment for the Mineral Transformation of Chrysotile as an Alternative for Asbestos Waste Management. *Environmental Geochemistry and Health*. 2024; 46: 332. DOI: 10.1007/s10653-024-01993-6
57. Van Meerbeek, V., van der Hitzky, R. Mechanism of the Grafting of Organosilanes on Mineral Surfaces. II. Secondary Reaction during the Grafting of Alkenylchlorosilanes. *Colloid and Polymer Science*. 1979; 257: 178–181.
58. Fowler, A., Santelli, C., Teng, H. Fungi Induced Chemical Weathering of Asbestiform Chrysotile. In: *GSA Annual Meeting 2015: conference abstracts*, Baltimore, Maryland, USA. 2015.

Сведения об авторах

Наумова Людмила Николаевна, канд. техн. наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, naumova_ln@mail.ru

Строкова Валерия Валерьевна, докт. техн. наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, vvstrokova@gmail.com

Куценко Павел Александрович, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, kutspv@yandex.ru

Абзалилова Алина Валентиновна, канд. техн. наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, alina.ishchenko.92@mail.ru

Рулев Данил Андреевич, аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, danilruly22@gmail.com

Authors Details

Lyudmila N. Naumova, PhD, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, naymova_ln@mail.ru

Valeria V. Strokova, DSc, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, vvstrokova@gmail.com

Pavel A. Kutsenko, Research Assistant, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, kutspv@yandex.ru

Alina V. Abzalilova, PhD, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, alina.ishchenko.92@mail.ru

Danil A. Rulev, Research Assistant, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 46, Kostyukova, 308012, Belgorod, Russia, danilruly22@gmail.com

Вклад авторов

Наумова Л.Н. – исследование; сбор материала; написание исходного текста; итоговые выводы.

Строкова В.В. – научное руководство; доработка текста; итоговые выводы.

Куценко П.А. – участие в анализе источников; подбор и анализ данных для иллюстраций.

Абзалилова А.В. – участие в анализе источников; участие в разработке иллюстраций.

Рулев Д.А. – участие в анализе источников; участие в разработке иллюстраций.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Naumova L.N. – investigation; data curation, writing– original draft preparation.

Strokova V.V. – supervision; writing–review and editing.

Kutsenko P.A. – data curation.

Abzalilova A.V. and Rulev D.A. – flow-chart description.

The authors declare no conflicts of interests.