

DOI: 10.15593/2224-9826/2015.2.12

УДК 691+669.9

Е.А. Щеткова, Р.В. Севастьянов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ХРИЗОТИЛ КАК ОПТИМАЛЬНЫЙ АРМИРУЮЩИЙ АГЕНТ ДЛЯ ФИБРОБЕТОНОВ

Рассмотрены хризотилловые волокна природного генезиса с точки зрения их оптимальности в качестве армирующего агента для фибробетонов. На основании спектра физико-механических и экологических свойств сформулированы требования-критерии оптимальности армирующего агента, такие как модуль Юнга волокна, отношение модулей Юнга волокна к модулю цементной матрицы, адгезионная и когезионная прочность, термостойкость. В качестве экологических критериев выбран спектр свойств, описывающих воздействие волокон на живой организм, активной и пассивной канцерогенности. Выполнен анализ медицинских исследований по вопросу экологичности хризотилловых волокон и показана их сравнительная безвредность. Обобщена статистика риска преждевременной смертности в зависимости от различных факторов, в том числе бытовых, в сравнении с риском смертности, вызванным проживанием в доме, в котором использованы строительные элементы, содержащие хризотил. Показано, что риск смертности, вызванной контактом с хризотилом, на порядки меньше, чем риск смертности, вызванной, например, содержанием радона в воздухе жилых помещений или электротравмами и курением. Представленные факты позволяют сделать вывод о сравнительной безвредности хризотила. Дано объяснение различным группам волокон, имеющим общее название «асбест». Показано, что именно хризотилловые волокна обладают наилучшими экологическими свойствами.

В работе показано, что с точки зрения жесткостных и прочностных свойств хризотилловые волокна обладают рядом преимуществ по сравнению с своими «конкурентами», а их структура, обуславливающая изобилие поверхностно-активных элементов, обеспечивает непревзойденные адгезионные свойства. Все эти качества хризотилловых волокон делают их оптимальными для использования в качестве армирующего агента для фибробетонов.

Ключевые слова: асбест, хризотил, амфиболы, асбестоцемент, хризотилцемент, фибробетон, армирующее волокно, канцерогенность.

E.A. Shchetkova, R.V. Sevast'ianov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

CHRYSOTILE AS OPTIMAL REINFORCING AGENT FOR FIBER-REINFORCED CONCRETE

The present work is devoted to the natural genesis of chrysotile fibers in terms of optimality as a reinforcing agent for fiber-reinforced concrete. Based on the spectrum of physicomachanical and environmental properties, the requirements are formulated optimality criteria reinforcing agent, such as Young's modulus of the fiber, the Young's modulus ratio of fiber modulus to the cement matrix, the

adhesive and cohesive strength, heat resistance. As environmental criteria selected range of active and passive properties of carcinogenicity, describing the impact of the fibers on a living organism. The paper summarizes and analyzes the medical research on the issue of sustainability of chrysotile fibers and shown to be relatively harmless. A generalization of statistics on the risk of premature death, depending on various factors, including household, compared with the risk of mortality due to living in a house that uses the building elements containing chrysotile. It is shown that the risk of mortality due to exposure to chrysotile on orders less than the risk of mortality due to, for example, radon in indoor air or electrical shocks and smoking. The facts presented lead to the conclusion about the relative safety of chrysotile. An explanation of the various groups of fibers called the common brand "asbestos". It is shown that chrysotile fibers have the best environmental properties.

It is shown that in terms of stiffness and strength properties of chrysotile fibers significantly bypass their competitors, and their structure is caused by an abundance of surface-active elements provides unmatched adhesion properties. All of these qualities make them chrysotile fibers optimal for use as a reinforcing agent for fiber-reinforced concrete.

Keywords: asbestos, chrysotile, amphibole, asbestos cement, chrysotile cement, fiber concrete, reinforcing fiber, carcinogenicity.

Классическим примером фибробетонов является хризотилцемент или асбестоцемент – наиболее широко применяемый строительный материал в мире. История использования и применения этого строительного материала исчисляется сотнями лет. В наше время фибробетоны, в которых в качестве армирующего волокна выступает хризотил, являются одними из перспективных конструкционных материалов. В проекте Стратегии развития промышленности строительных материалов Правительства Российской Федерации на период до 2020 г. хризотилцементные изделия признаны основными в строительстве, их повсеместное внедрение будет содействовать прогрессу отрасли и совершенствованию технологии цементных композиционных материалов.

Проблема создания новых материалов на основе хризотил-асбеста с заданными физико-механическими свойствами заключается в оценке не только эффективности армирования, но и возможных канцерогенных свойств данного хризотилового волокна. Российская Федерация выступает за контролируемое использование строительных материалов на основе хризотил-асбеста. В Постановлении Правительства «О позиции Российской Федерации по вопросу использования хризотилового асбеста» от 31.07.1998 № 869 указано, что «принятые запреты применения асбеста в ряде стран основаны на медико-биологических и статистических данных по асбестообусловленным заболеваниям, вызванным использованием в основном асбеста амфиболовой группы, и не учитывают национальных социально-экономических интересов, результатов научных исследований и научно-технических достижений последних лет».

Для оптимизации физико-механических свойств бетонов волокна должны отвечать определенным требованиям, при этом эффективность армирования фиброволокнами оценивается по нескольким параметрам: модуль упругости, прочность на разрыв, деформативность, химическая стойкость, адгезионные свойства, относительное удлинение, коэффициент линейного расширения, сопротивление динамическим воздействиям и др. Для обеспечения совместной работы бетонной матрицы и армирующих волокон за счет физического и химического сцепления в зоне раздела поверхностей и последующей передачи приложенной нагрузки фиброволокнам их модуль упругости должен быть больше 8 ГПа (модуль упругости для цементного камня без учета работы заполнителя). Именно использование волокон с модулем упругости большим, чем у цементного камня, позволяет передать основную долю приложенных напряжений посредством касательных сил от цементной матрицы к армирующим волокнам.

Хризотил-асбест, выступая в роли армирующего вещества, отличается повышенным модулем упругости и отвечает всем требованиям, предъявляемым к армирующим волокнам. Модуль упругости недеформированных волокон хризотила при площади поперечного сечения порядка $0,01 \text{ мм}^2$ составляет 175–210 ГПа. Его прочность при растяжении вдоль волокон равна порядка $30\,000 \text{ кгс/см}^2$, что выше прочности стали. Щелочная среда портландцементов является агрессивной по отношению ко всем видам минеральных волокон, но хризотил нерастворим в воде и химически стоек в щелочной среде. Высокая поверхностная энергия и развитая поверхность волокон способствуют образованию устойчивых композиций с цементом, битумом и разными органическими соединениями, т.е. хорошие сорбционные способности и возникновение прочных топохимических связей позволяет хризотилловому волокну проявлять активную адгезию к большинству связующих и дисперсных ингредиентов [1, 2]. Теплопроводность готового хризотилцемента может существенно изменяться в зависимости от плотности и содержания хризотилловых волокон. При наибольшей плотности (1900 кг/м^3) и естественной влажности теплопроводность является весьма низкой и составляет $1470,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Хризотилцемент тепло- и морозостоек, выдерживает длительную эксплуатацию при $250 \text{ }^\circ\text{C}$ и порядка 50 циклов замораживания-оттаивания, сохраняет свои первоначальные физико-механические свойства. В итоге фибробетоны,

армированные хризотиловыми волокнами, обладают большей прочностью при растяжении, огнестойки, долговечны и обладают высокими электроизоляционными свойствами. Согласно исследованиям [2] содержание хризотила 0,5–1,5 % в бетоне увеличивает прочность при изгибе на 20–35 %, а при сжатии – на 10–11 %.

На сегодняшний день актуально создание композиционных материалов с заданными свойствами, обладающих экономичностью, доступностью, экологичностью и особыми физико-механическими свойствами, например высокими прочностными характеристиками, поэтому использование хризотилового волокна в качестве армирующего агента в фибробетонах требует дальнейших исследований. Но в связи с тем, что Международное агентство по изучению рака (МАИР) отнесло асбест, в том числе хризотил, к 1-й группе веществ, повышающих риск развития злокачественных опухолей и являющихся веществами с доказанными канцерогенными для человека свойствами [3–8], использование этого вещества в качестве добавки в строительные материалы затруднено. Но если рассмотреть подробнее представленную классификацию МАИР, можно заметить, что она охватывает лишь вопросы определения и характеристики опасности веществ или смесей, не включая данные о воздействии этих веществ или компонентов за определенный период времени и токсикологические проявления заболеваний в действующих на сегодняшний день условиях использования. Единственное, было выяснено, что в случае с хризотилом рак легких развивается только на фоне асбестоза или пылевого бронхита. Эти профессиональные заболевания являются прямым результатом прежде всего несоблюдения широко известных правил безопасности на производстве – защиты органов дыхания. Большинство авторитетных специалистов сходятся во мнении, что реализация патогенного эффекта при асбестоовом канцерогенезе, как и при любом другом, реализуется в плоскости «доза – эффект». Тем не менее, что касается порога наличия заболеваемости для онкопатологии, ассоциированной с асбестом, единство мнений экспертов пока не достигнуто [8–16]. Существующие на сегодняшний день оценки рисков канцерогенности хризотилового волокна и асбеста в целом базируются преимущественно на исследовании высоких уровней экспозиции. Достоверно известно, что высокие уровни экспозиции приводят к возникновению заболеваний раком легких, но снова в исследованиях часто нет дифференциации по влиянию

различных видов асбеста. Вопрос относительно того, вызывают ли низкие экспозиции риск развития рака легких, поскольку они ниже кумулятивного воздействия, находится в стадии изучения [10, 13, 17–28].

Кроме того, классификация МАИР не дифференцирует по степени возможной опасности разные виды минеральных волокон, входящих в группу асбестов. Для примера, сравнительная оценка риска по числу возможных преждевременных смертей в расчете на 1 млн населения – жителей зданий с асбестосодержащими материалами оказалась равной 0,04, в то время как за счет радона, содержащегося в воздухе жилых помещений, – от 2 до 5. Риск для окружающих за счет табакокурения составляет от 5 до 20 случаев. Для сравнения риски других уровней: от электротравм – 0,3; от съедания раз в неделю жареного на углях мяса – 0,1; от курения – 2190 [5–7].

С другой стороны, за счет естественного выветривания горных пород организм человека регулярно контактирует с волокнами хризотила, постоянно присутствующими в воздухе окружающей среды. Серпентиновые минералы являются почвообразующими и повсеместно обнаруживаются в земной коре. Хризотил в концентрации порядка 0,0005 вол/мл (500 вол/м³) всегда имеется в атмосферном воздухе. В зависимости от региона каждый человек ежедневно вдыхает порядка 10 тыс. асбестовых волокон и выпивает воды, содержащей от 200 000 до 2 000 000 волокон в каждом литре, без какого-либо вреда для организма [14, 16, 26, 28–30]. Несомненно, дополнительным источником загрязнения окружающей среды волокнами хризотила являются промышленные разработки его месторождений. Это способствует увеличению содержания волокон данного минерала во вдыхаемом человеком воздухе рабочей зоны на промышленных объектах. Хотя показано [2–9], что даже в промышленных масштабах существующие низкие уровни воздействия хризотила не смогли создать существенного риска заболеваемости. Это подтверждают исследования [8, 10, 11, 13, 31, 32] состояния здоровья весьма значительного количества людей, живущих рядом с хризотиловыми рудниками или на рудных телах хризотила, показавшие отсутствие чрезмерного асбестообусловленного риска заболеваемости в этих районах.

Кроме того, отсутствие последовательности в номенклатуре асбеста часто способствовало неопределенности в конкретной идентификации асбестовых минералов, представленных в литературе. В связи

с возрастающим количеством последних фактов относительно различия опасности хризотил-асбеста и других видов амфиболовых асбестов возникла необходимость лучше дифференцировать характеристики опасности, связанные с этими двумя группами асбестов. Современные исследования свидетельствуют, что тяжелые асбестообусловленные заболевания легких могут быть вызваны только асбестами амфиболовой группы, которые запрещены для использования во всем мире. В отношении хризотила был ужесточен контроль использования.

Поэтому необходимо знать, что термин «асбест» прежде всего является коммерческим или собирательным названием и обозначает разные по минералогическому строению, физико-химическим свойствам и биологической агрессивности минералы. Эти силикатные минералы относятся к разным группам: серпентинам и амфиболам – объединяет их только волокнистое строение и, как следствие, некоторые общие направления промышленного применения. Силикаты делятся на группы по строению кристаллической решетки, в основе которой лежит кремнекислородный тетраэдр, т.е. атом кремния, соединенный с четырьмя атомами кислорода. Амфиболы по этой классификации относятся к ленточным силикатам, а серпентины – к слоистым.

Большинство ленточных силикатов, амфиболов, относится к группе роговой обманки. Амфиболовая надгруппа объединяет в себе большое количество минералов, но в промышленности чаще всего использовались: актинолит, амозит (коричневый асбест), куммингтонит, антофиллит, крокидолит (голубой асбест), тремолит или любая смесь, содержащая один или более из названных минералов [1–4, 8].

В обобщенном виде формула роговой обманки записывается в виде $R_7[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$, где $R = Ca, Mg, Fe$. Кроме собственно роговой обманки, у амфиболов выделяется изоморфный ряд тремолита ($Ca_2Mg_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2$) и актинолита ($Ca_2Fe_5(Si_4O_{11})_2(OH)_2$) и группа щелочных амфиболов с повышенным содержанием натрия [34].

В ленточных силикатах бесконечные цепочки тетраэдров соединены попарно, что отражается в формуле как блок $Si_4O_{11}^{6-}$. Амозит и крокидолит обладают волокнистой структурой, а тремолит, актинолит и антофиллит могут обладать и волокнистой, и не волокнистой структурой. Минералы этой надгруппы сходны по физико-механическим свойствам с хризотил-асбестом, но имеют существенные различия в минералогической структуре. В противоположность хризотил-асбесту у амфи-

болов базовая структура имеет Г-образную форму с углом, связанным $(\text{SiO}_4)^{4-}$ тетраэдрами, соединенными двойной тетраэдральной цепочкой, которая включает в себя слой с Ca_2Mg_5 . В отличие от хризотила в тремолите магний заключен внутри Г-образной структуры [3, 4, 34]. Эти амфиболовые разновидности обладают высокой кислотостойкостью и щелочноупорностью, большой сорбционной способностью.

В слоистых силикатах, в отличие от ленточных, кремнекислородные тетраэдры образуют бесконечные слои, обозначаемые как $\text{Si}_4\text{O}_{10}^{4-}$. Простейшая для слоистых силикатов структура отмечается для серпентина $\text{Mg}_6(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$. У серпентина выделяются массивная (лизардит), листоватая (антигорит) и волокнистая (хризотил) формы. Кроме того, встречается серпентин с высоким содержанием никеля (гарниерит).

Таким образом, хризотил, лизардит и антигорит являются тремя основными полиморфными модификациями силикатных минералов группы серпентинов. Но только хризотил $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ обладает волокнистой структурой с каналом вдоль оси волокна. Химическая формула хризотила содержит в себе силикатный слой состава $(\text{Si}_2\text{O}_5)_n^{2n-}$, в котором три атома кислорода в каждом тетраэдре делят связи со смежными тетраэдрами и несиликатным слоем состава $[\text{Mg}_3\text{O}_2(\text{OH})_4]_n^{2n+}$. В хризотиле расстояния между кислородными вершинами в силикатном слое короче, чем расстояния между кислородными вершинами в магнийсодержащем слое, что приводит к скручиванию слоев с образованием полых цилиндров. Молекула магния располагается вне завитков и, таким образом, подвергается воздействию окружающей среды. Тетраэдры соединяются друг с другом тремя общими вершинами и образуют плоский слой непрерывной протяженности в двух измерениях. Каждый слой с помощью ненасыщенных атомов кислорода, обращенных друг к другу, связан с другим аналогичным по строению слоем за счет диполь-дипольного притяжения, поэтому при измельчении наблюдается легкая расщепляемость хризотила на тончайшие волокна, хотя при этом данную волокнистую массу трудно перетереть в порошок [3, 4, 34]. Кроме названия «хризотил» часто используются синонимы: хризотил-асбест, асбест, серпентин-хризотил, серпентин-асбест.

Во многих исследованиях [10, 11, 17–30] было показано, что хризотил не обладает теми же активными биологическими свойствами и онкоопасностью, что и амфиболы, и выводится из легких быстрее, чем амфиболовые волокна.

В настоящее время получает распространение большое количество аналогов хризотил-асбеста, различных по своим химическим и физико-механическим свойствам: стеклянные, базальтовые, керамические, полимерные и др. Но ни один из заменителей в полной мере не соответствует комплексу физико-механических свойств хризотила, а также его экономичности. Если же оценивать технологии создания заменителей, то хризотилловые волокна по экологичности как природное минеральное сырье снова выигрывает, не требуя затрат энергии на плавление и при этом не выделяя в атмосферу газообразные и пылевые загрязнители. Кроме того, воздействие этих заменителей на здоровье людей пока слабо изучено. Как уже описывалось выше, волокна хризотила являются естественным «спутником» человека. Хризотил-асбест выводится из организма человека за период, равный двум неделям, для сравнения: керамическое волокно имеет период полураспада 60 дней, арамидное волокно (кевлар) – до 90 дней, а целлюлозное волокно – более 1000 дней.

В последние годы практически все искусственные минеральные волокна занесены в список возможных и вероятных канцерогенов. В отчете INSERM (1998 г., с. 2) о воздействиях на состояние здоровья некоторых заменителей асбеста говорится: «Поскольку волоконная структура асбеста является главным патогенным фактором, любые новые волокна, предлагаемые в качестве заменителя асбеста, должны автоматически проверяться на патогенность в связи с их структурой». Международная организация труда и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) уже сейчас предупреждают о том, что при использовании искусственных минеральных волокон необходимо принимать меры предосторожности, аналогичные или даже более жесткие по сравнению с применяемым при работах с хризотилом [11, 14].

Вне промышленного производства человек обычно контактирует с различными хризотилсодержащими материалами. В них волокна надежно связаны с бетонной матрицей. Это происходит потому, что в процессе гидратации цементного вяжущего происходит гидролиз трехкальциевого силиката с выделением гидроксида кальция. Образующийся в процессе химических реакций гидроксид кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ занимает 22,2 % от массы всех новообразований, т.е. практически пятую часть плотного цементного вещества [35]. Образовавшийся гидроксид кальция взаимодействует с веществами, находящимися в бетонной матрице, в результате чего ионы кальция хемосорбируются хризолитовыми

волокнами в позиции, не заполненные магнием. Таким образом формируется монослой портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на внешней поверхности волокон хризотил-асбеста. В итоге при дальнейшем взаимодействии уже с углекислотой воздуха на поверхности хризотилового волокна образуется сросток кальцита (CaCO_3) с волокнистой фазой [33, 35–38]. Именно эти процессы ведут к безвозвратному изменению состава, физико-химических и биологических характеристик хризотила. Волокна настолько прочно соединяются с матрицей фибробетонов, что при их разрушении в воздух выделяются только конгломераты из волокон, частиц цемента и прочих связующих, что полностью исключает активное биологическое воздействие хризотилцементных изделий, в том числе подвергшихся многолетним атмосферным воздействиям. Выявленная тенденция снижения биологической активности хризотилковых волокон под воздействием окружающей среды и продуктов гидратации портландцемента в (10 и 30 раз соответственно) доказывает нецелесообразность мероприятий, направленных на возможный запрет использования хризотила в производстве [15, 36–39].

В России, отвечающей за 40 % производства асбестов в мире, используется и добывается только хризотилковый асбест. Два самых крупных предприятия ОАО «Ураласбест» и ОАО «Оренбургские минералы» экспортируют 60 % своей продукции [11]. На основе хризотила разрабатываются около 3 тыс. наименований изделий, при этом создаются хризотилцемент (на создание асбестоцементных изделий идет около 75 % всего добываемого в мире хризотила), несгораемые текстильные изделия, огнестойкие краски, наполнители для пластмасс и мн. др.

Представленные в статье материалы позволяют сделать вывод о том, что хризотилковые волокна являются одним из лучших и перспективных армирующих агентов для использования в фибробетонах.

Библиографический список

1. Онкологическая заболеваемость работников асбестоцементных производств / А.М. Нагорная, Ю.И. Кундиев, Д.В. Варивончик [и др.] // Медицина труда и промышленная экология. – 2008. – № 3. – С. 27–33.
2. Саженко Д.С. Цементные бетоны с реакционно-активным диатомитом, армированные хризотилом: дис. ... канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 178 с.

3. Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite, and anthophyllite). In: A Review of Human Carcinogens: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts // IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans.– 2012.– Vol. 100C. – URL: [http:// monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/ mono100C-11.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C-11.pdf).

4. Health and Safety Executive. HSG 248 ‘Asbestos: The analysts’ guide for sampling, analysis and clearance procedures’. – London: HSE Books, 2005.

5. Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to man / International Agency for Research on Cancer (IARC). – 1973. – Vol. 2. – 181 p.

6. NTP 11th Report on Carcinogens. National Toxicology Program (NTP). – Rep Carcinog. – 2004. – P. 11:1–A32.

7. USGS (U.S. Geological Survey). Fact sheet: Some facts about asbestos, United States Department of the Interior. USGS Fact Sheet FS-012–01:1–4, 2001. – 4 p.

8. Ковалевский Е.В., Кашанский С.В. Современные подходы к нормированию асбестосодержащих пылей // Медицина труда и промышленная экология. – 2008. – № 3. – С. 9–15.

9. Hodgson J.T., Darnton A. The quantitative risks of mesothelioma and lung cancer in relation to asbestos exposure // Ann. Occup. Hyg. – 2000. – Vol. 44, no. 8. – P. 565–601.

10. White N., Nelson G., Murray J. South African experience with asbestos related environmental mesothelioma: Is asbestos fiber type important? // Regulatory Toxicology and Pharmacology. – 2008. – Vol. 52, no. 1. – P. S92–S96.

11. Безопасность и здоровье при производстве и использовании асбеста и других волокнистых материалов: сб. докл. и выступ. междунар. конф., Екатеринбург, 7 июня 2002 г. – Асбест: Асбестовая ассоциация, 2003. – 176 с.

12. Варивончик Д.В. Оценка канцерогенной опасности асбоцементного производства Украины // Український журнал з проблем медицини праці. – 2012. – № 2(30). – С. 3–13.

13. Варивончик Д. В. Изучение заболеваемости раком и канцерогенных рисков среди работников асбестоцементного производства в Украине // Здоровье населения и среда обитания. – 2013. – № 4. – С. 18–20.

14. Изменение структуры и химического состава волокон хризотил-асбеста под воздействием технологических факторов производства известково-кремнеземистых теплоизоляционных изделий / Т.И. Григоренко, Н.А. Захарова, Н.Т. Картель, А.В. Бричка, Е.И. Оранская, Б.М. Горелов, С.Я. Бричка // *Хімія, фізика та технологія поверхні*. – 2014. – Т. 5, № 3. – С. 349–357.

15. Кашанский С.В. Мезотелиома в России: системный обзор 3576 опубликованных случаев с позиций медицины труда // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2008. – № 3. – С. 15–21.

16. Пятница-Горпинченко Н.К. Асбест и волокнистый канцерогенез // *Environment & Health*. – 2014. – № 1. – С. 4–9.

17. Bernstein D.M., Hoskins J.A. The health effects of chrysotile: current perspective based upon recent data // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* – 2006. – Vol. 45 (3). – P. 252–264.

18. An experimental approach to the evaluation of the biopersistence of respirable synthetic fibers and minerals / D.M. Bernstein, R. Mast, R. Anderson, T.W. Hesterberg, R. Musselman, O. Kamstrup, J. Hadley // *Environ. Health Perspect.* – 1994. – Vol. 102, suppl. 5). – P. 15–18.

19. Biopersistence of synthetic mineral fibers as a predictor of chronic intraperitoneal injection tumor response in rats / D.M. Bernstein, J.M. Riego-Sintes, B.K. Ersboell, J. Kunert // *Inhal. Toxicol.* – 2001b. – Vol. 13(10). – P. 851–875.

20. Bernstein D.M., Rogers R., Smith P. The biopersistence of Canadian chrysotile asbestos following inhalation // *Inhal. Toxicol.* – 2003. – Vol. 15(13). – P. 1247–1274.

21. Bernstein D.M., Rogers R., Thevenaz P. The inhalation biopersistence and morphologic lung disposition of pure chrysotile asbestos in rats // *Toxicol. Sci. Toxicologist.* – 2000. – Vol. 54(1). – P. 318.

22. Dodie Fikfak M. The amphibole hypothesis – a nested case-control study of lung cancer and exposure to chrysotile and amphiboles // *Arh. Hig. Rada.Toksikol.* – 2003. – № 54. – P. 169–176.

23. Dyczek J. Surface of asbestos cement roof sheets and assessment of the risk of asbestos release // *Proceedings of the global asbestos congress, Japan, November 19–21.* – Tokyo, 2004.

24. Gibbs G.W., Berry G. Mesothelioma and asbestos. – *Regul. Toxicol. Pharmacol.* – 2008. – Vol. 52, suppl. 1. – P. 223–231.

25. Short, fine and WHO asbestos fibers in the lungs of Quebec workers with an asbestossrelated disease / G. Adib, F. Labreche, L. De Guir [et al.] // *Am. J. Ind. Med.* – 2013. – Vol. 56 (9). – P. 1001–1014.

26. Shurny K., Monig F., Hochrainer D. Zur Messung von Schadstoffemissionen aus Oberflächenquellen // *Staub Reinhaltung der Luft.* – 1985. – Band 45, № 7–8. – S. 328–330.

27. Mortality from occupational exposure to relatively pure chrysotile: a 39-year study / L. Sichletidis, D. Chloros, D. Spyrtatos [et al.] // *Respiration.* – 2009. – Vol. 78, no. 1. – P. 63–68.

28. Spurny K., Weiss G., Opiela H. Zur Emission von Asbestfasern aus Asbestzementplatten // *Staub Reinhaltung der Luft.* – 1979. – Band 39, № 11. – S. 422–427.

29. Meyer E. Untersuchungen zur bedeutung der verwitterung von Asbestzementflächen für die Asbestfaser konzentration in der Umwelt // *Staub Reinhaltung der Luft.* – 1986. – Band 46, № 11. – S. 482–484.

30. Еловская Л.Т. Профессиональный взгляд на антиасбестовую кампанию // *Строительные материалы.* – 2008. – № 9. – С. 32–33.

31. Минералы и горные породы СССР / Т.Б. Здорик, В.В. Матиас, И.Н. Тимофеев, Л.Г. Фельдман. – М.: Книга по Требованию, 2013. – 488 с.

32. Мнение российской группы экспертов по проблеме тотального запрета асбеста: научное издание / Некоммерч. организация «Хризотиловая ассоциация». – М.; Белгород, 2002. – 56 с.

33. Наумова Л.Н. Повышение качества асбестоцементных изделий на основе модифицированного хризотил-асбеста: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2006. – 160 с.

34. Национальные программы по ликвидации заболеваний, связанных с асбестом: обзор и оценка [Электронный ресурс] // *Материалы совещания Всемирной организации здравоохранения, 7–8 июня 2011.* – URL: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/176336/National-Programmes-For-Elimination-Of-Asbestos-related-Diseases-Review-And-Assessment-Rus.pdf (дата обращения: 05.02.2015).

35. Щеткова Е.А. Севастьянов Р.В. Процессы структуро- и фазообразования в системе «вяжущее вещество (цемент) – вода – заполнитель» и их влияние на свойства бетона // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика.* – 2014. – № 4. – С. 48–58.

36. Везенцев А.И., Нейман С.М., Гудкова Е.А. Превращения и изменения свойств хризотил-асбеста под влиянием различных факторов // *Строительные материалы*. – 2006. – № 6. – С. 104–105.

37. Влияние модификации поверхности волокон хризотила на его биологическую активность / Л.Н. Пылев, О.В. Смирнова, Л.А. Васильева, А.И. Везенцев, Е.А. Гудкова // *Гигиена и санитария*. – 2007. – № 2. – С. 77–80.

38. К вопросу об изменении поверхностных и биологических свойств хризотила в асбестоцементе / А.И. Везенцев, Е.А. Гудкова, Л.Н. Пылев, О.В. Смирнова // *Строительные материалы*. – 2008. – № 9. – С. 26–27.

39. Ковалевский Е.В., Кашанский С.В. Нормативно-методическое обеспечение безопасного контролируемого использования хризотил-асбеста в России // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2011. – № 5. – С. 44–48.

References

1. Nagornaia A.M., Kundiev Iu.I., Varivonchik D.V. [et al.] *Onkologicheskaja zaboлеваemost' rabotnikov asbestotsementnykh proizvodstv* [Cancer incidence of workers in asbestos industries]. *Meditcina truda i promyshlennaia ekologiia*, 2008, no. 3, pp. 27-33.

2. Sadenko D.S. *Tsementnye betony s reakcionno-aktivnym diatomitom, armirovannye hrizotilom* [Cement concrete with reactive diatomite, reinforced asbestos]. Thesis of Doctor's degree dissertation, Penza, 2013, 178 p.

3. Asbestos (chrysotile, amosite, crocidolite, tremolite, actinolite, and anthophyllite). In: *A Review of Human Carcinogens: Arsenic, Metals, Fibres, and Dusts. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, 2012, vol. 100C., available at: [http:// monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/ mono100C-11.pdf](http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol100C/mono100C-11.pdf).

4. Health and Safety Executive. HSG 248 'Asbestos: The analysts' guide for sampling, analysis and clearance procedures'. London: HSE Books, 2005.

5. *Monographs on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to man*. International Agency for Research on Cancer (IARC), 1973, vol. 2. 181 p.

6. NTP 11th Report on Carcinogens. National Toxicology Program (NTP). Rep Carcinog. 2004, pp. 11:1–A32.

7. USGS (U.S. Geological Survey). Fact sheet: Some facts about asbestos, United States Department of the Interior. USGS Fact Sheet FS-012–01:1–4, 2001. 4 p.

8. Kovalevskii E.V., Kashanskii S.V. Sovremennye podkhody k normirovaniuu asbestsoderzhashchikh pylei [Modern approaches to the valuation of the asbestos-containing dusts]. *Meditcina truda i promyshlennaia ekologiia*, 2008, no. 3, pp. 9-15.

9. Hodgson J.T., Darnton A. The quantitative risks of mesothelioma and lung cancer in relation to asbestos exposure. *Ann. Occup. Hyg.*, 2000, vol. 44, no. 8, pp. 565-601.

10. White N., Nelson G., Murray J. South African experience with asbestos related environmental mesothelioma: Is asbestos fiber type important? *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 2008, vol. 52, no. 1, pp. S92-S96.

11. Sbornik dokladov i vystuplenii mezhdunarodnoi konferentsii “Bezopasnost' i zdorov'e pri proizvodstve i ispol'zovanii asbesta i drugikh voloknistykh materialov” [Health and safety in the manufacture and use of asbestos and other fibrous materials]. *Asbest: Asbestovaia assotsiatsiia*, 2003. 176 p.

12. Varivonchik D.V. Otsenka kantserogennoi opasnosti asbotsementnogo proizvodstva Ukrainy [The evaluation of the carcinogenic risk of asbestos cement production in Ukraine]. *Ukraïns'kii zhurnal z problem meditsini pratsi*, 2012, no. 2(30), pp. 3-13.

13. Varivonchik D.V. Izuchenie zaboлеваemosti rakom i kantserogennykh riskov sredi rabotnikov asbestotsementnogo proizvodstva v Ukraine [The study of cancer and cancer risks among workers in asbestos-cement production in Ukraine]. *Zdorov'e naseleniia i sreda obitaniia*, 2013, no. 4, pp. 18-20.

14. Grigorenko T.I., Zaharova N.A., Kartel' N.T., Brichka A.V., Oranskaia E.I., Gorelov B.M., Brichka S.Ia. Izmenenie struktury i khimicheskogo sostava volokon hrizotil-asbesta pod vozdeistviem tekhnologicheskikh faktorov proizvodstva izvestkovo-kremnezemistykh teploizoliatsionnykh izdelii [Changes in the structure and chemical composition of the fibers of chrysotile asbestos under the influence of technologi-

cal factors of production lime-silica insulation products]. *Himiia, fizika ta tehnologiia poverkhni*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 349-357.

15. Kashanskii S.V. Mezotelioma v Rossii: sistemnyi obzor 3576 opublikovannykh sluchaev s pozitsii meditsiny truda [Mesothelioma in Russia: a systematic review 3576 published cases from the standpoint of occupational medicine]. *Meditsina truda i promyshlennaia ekologiia*, 2008, no. 3, pp. 15-21.

16. Piatnitsa-Gorpinchenko N.K. Asbest i voloknistyi kantserogenez [Asbestos and fibrous carcinogenesis]. *Environment & Health*, 2014, no. 1, pp. 4-9.

17. Bernstein D.M., Hoskins J.A. The health effects of chrysotile: current perspective based upon recent data. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 2006, vol. 45 (3), pp. 252-264.

18. Bernstein D.M., Mast R., Anderson R., Hesterberg T.W., Musselman R., Kamstrup O., Hadley J. An experimental approach to the evaluation of the biopersistence of respirable synthetic fibers and minerals. *Environ. Health Perspect.*, 1994, vol.102, suppl. 5, pp. 15-18.

19. Bernstein D.M., Riego-Sintes J.M., Ersboell B.K., Kunert J. Biopersistence of synthetic mineral fibers as a predictor of chronic intraperitoneal injection tumor response in rats. *Inhal. Toxicol.*, 2001b, vol. 13(10), pp. 851-875.

20. Bernstein D.M., Rogers R., Smith P. The biopersistence of Canadian chrysotile asbestos following inhalation. *Inhal. Toxicol.*, 2003, vol. 15(13), pp. 1247-1274.

21. Bernstein D.M., Rogers R., Thevenaz P. The inhalation biopersistence and morphologic lung disposition of pure chrysotile asbestos in rats. *Toxicol. Sci. Toxicologist*, 2000, vol. 54(1), p. 318.

22. Dodie Fikfak M. The amphibole hypothesis – a nested case-control study of lung cancer and exposure to chrysotile and amphiboles. *Arh. Hig. Rada.Toksikol.*, 2003, no. 54, pp. 169-176.

23. Dyczek J. Surface of asbestos cement roof sheets and assessment of the risk of asbestos release. *Proceedings of the global asbestos congress*. Tokyo, 2004.

24. Gibbs G.W., Berry G. Mesothelioma and asbestos. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 2008, vol. 52, suppl. 1, pp. 223-231.

25. Adib G., Labreche F., De Guir L. [et al.] Short, fine and WHO asbestos fibers in the lungs of Quebec workers with an asbestossrelated disease. *Am. J. Ind. Med.*, 2013, vol. 56 (9), pp.1001-1014.

26. Shurny K., Monig F., Hochrainer D. Zur Messung von Schadstoffemissionen aus Oberflächenquellen. *Staub Reinhaltung der Luft*, 1985, band 45, no. 7–8, pp. 328-330.

27. Sichletidis L., Chloros D., Spyrtos D. [et al.] Mortality from occupational exposure to relatively pure chrysotile: a 39-year study. *Respiration*, 2009, vol. 78, no. 1, pp. 63-68.

28. Spurny K., Weiss G., Opiela H. Zur Emission von Asbestfasern aus Asbestzementplatten. *Staub Reinhaltung der Luft*, 1979, band 39, no. 11, pp. 422-427.

29. Meyer E. Untersuchungen zur bedeutung der verwitterung von Asbestzementflächen für die Asbestfaser konzentration in der Umwelt. *Staub Reinhaltung der Luft*, 1986, band 46, no. 11, pp. 482-484.

30. Elovskaja L.T. Professional'nyi vzgliad na antiasbestovuiu kampaniiu [Professional look to the anti-asbestos campaign]. *Stroitel'nye materialy*, 2008, no. 9, pp. 32-33.

31. Zdorik T.B., Matias V.V., Timofeev I.N., Fel'dman L.G. Mineraly i gornye porody SSSR [Minerals and rocks of the USSR]. Moscow: Kniga po Trebovaniu, 2013. 488 p.

32. Mnenie rossijskoi gruppy ekspertov po probleme total'nogo zapreta asbesta [The opinion of the Russian expert group on the issue of a total ban of asbestos]. Moscow; Belgorod: Nekommercheskaia organizatsiia "Hrizotilovaiia assotsiatsiia", 2002. 56 p.

33. Naumova L.N. Povyshenie kachestva asbestocementnykh izdelii na osnove modifitsirovannogo hrizotil-asbesta [Improving the quality of asbestos-cement products on the basis of modified chrysotile asbestos]. Thesis of Ph.D.'s degree dissertation. Belgorod, 2006. 160 p.

34. Natsional'nye programmy po likvidatsii zabolevanii, sviazannykh s asbestom: obzor i otsenka [National programme for the elimination of diseases related to asbestos: review and assessment]. *Materialy soveshchaniia Vsemirnoi organizatsii zdravookhraneniia*, available at: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/176336/National-Programmes-For-Elimination-Of-Asbestos-related-Diseases-Review-And-Assessment-Rus.pdf (accessed 05 February 2015).

35. Shchetkova E.A. Sevast'ianov R.V. Protssy strukturo- i fazoobrazovaniia v sisteme "viazhushchee veshchestvo (tsement) – voda – zapolnitel'" i ikh vliianie na svoistva betona [The processes of structure and phase formation in the system "binder (cement) – water – filler" and their

influence on the properties of concrete]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaia ekologiya. Urbanistika*, 2014, no. 4, pp. 48-58.

36. Vezentsev A.I., Neiman S.M., Gudkova E.A. Prevrashheniia i izmeneniia svoistv hrizotil-asbesta pod vlianiem razlichnykh faktorov [Transformation and change of properties of chrysotile asbestos under the influence of various factors]. *Stroitel'nye materialy*, 2006, no. 6, pp. 104-105.

37. Pylev L.N., Smirnova O.V., Vasil'eva L.A., Vezentsev A.I., Gudkova E.A. Vlianie modifikatsii poverkhnosti volokon hrizotila na ego biologicheskuiu aktivnost' [The influence of surface modification of chrysotile fiber on its biological activity]. *Gigiena i sanitaria*, 2007, no. 2, pp. 77-80.

38. Vezentsev A.I., Gudkova E.A., Pylev L.N., Smirnova O.V. K voprosu ob izmenenii poverkhnostnykh i biologicheskikh svoistv hrizotila v asbestotsemente [To the question about the change of surface and biological properties of chrysotile in asbestos cement]. *Stroitel'nye materialy*, 2008, no. 9, pp. 26-27.

39. Kovalevskii E.V., Kashanskii S.V. Normativno-metodicheskoe obespechenie bezopasnogo kontroliruemogo ispol'zovaniia hrizotil-asbesta v Rossii [Normative and methodological support of the safe, controlled use of chrysotile asbestos in Russia]. *Medsina truda i promyshlennaia ekologiya*, 2011, no. 5, pp. 44-48.

Получено 24.02.2015

Сведения об авторах

Щеткова Елена Андреевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры строительных конструкций и вычислительной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Elena_Schetkova@mail.ru).

Севастьянов Роман Валерьевич (Пермь, Россия) – старший преподаватель кафедры строительных конструкций и вычислительной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: R2777506@yandex.ru).

About the authors

Elena A. Shchetkova (Perm, Russian Federation) – Master student, Department of Building Structures and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: Elena_Schetkova@mail.ru).

Roman V. Sevast'ianov (Perm, Russian Federation) – Senior Lecturer, Department of Building Structures and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: R2777506@yandex.ru).