

ТЭХНІЧНАЯ ХІМІЯ І ХІМІЧНАЯ ТЭХНАЛОГІЯ
TECHNICAL CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERINGУДК 665.6.035.6
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-162-168>Поступила в редакцию 17.01.2023
Received 17.01.2023**О. В. Лукша, Н. П. Крутько, В. М. Чернецкая***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ГРУППОВОЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ
ОКИСЛЕННОГО БИТУМА В ПРИСУТСТВИИ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ
РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРЫ**

Аннотация. Изучены реологические свойства окисленного битума в присутствии волокнистых материалов на основе целлюлозы и хризотил-асбеста, используемых в качестве стабилизирующих добавок при производстве щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Установлено, что надмолекулярная структура волокон, характеризующая взаимодействие между макромолекулами, в значительной степени определяет эффективность их структурирующего действия для окисленного битума. Так, введение целлюлозного волокна приводит к повышению способности коллоидной структуры битума к одновременному возникновению упругой и пластической составляющих деформации, что обусловлено равномерным распределением волокна в дисперсионной среде битума вследствие проникновения углеводородных компонентов в межфибрилярное пространство целлюлозы и разрывам водородных связей между гидроксильными группами. В то же время наличие прочных структурных связей между макромолекулами хризотил-асбеста препятствует формированию прочной армирующей сетки в маслах битума и, как следствие, значения структурно-реологических параметров P_{k1} , P_{k2} и P_m композиции битум-хризотил-асбест в 1,5–2 раза ниже по сравнению со значениями для композиции битум/целлюлоза. Результаты исследования группового состава и структурно-реологических свойств битумных композиций после прогрева при $T = 163$ °С свидетельствуют о более высокой стабильности битумно-целлюлозной структуры к процессам термоокислительной деструкции по сравнению со структурой, сформированной в присутствии хризотил-асбеста. Методом тонкослойной хроматографии установлено, что концентрация масел в композиции битум-хризотил-асбест выше по сравнению с композицией битум-целлюлоза, свидетельствуя о том, что ослабление реологических свойств и термостабильности в присутствии хризотил-асбеста не связано с особенностями микроструктуры его волокон, склонной, по мнению ряда исследователей, к избирательной диффузии масел в капилляры фибрилл.

Ключевые слова: структурно-реологические свойства, термоокислительная деструкция, битумные композиции, групповой химический состав

Для цитирования. Лукша, О. В. Реологические свойства и групповой химический состав окисленного битума в присутствии волокнистых материалов различной структуры / О. В. Лукша, Н. П. Крутько, В. М. Чернецкая // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2023. – Т. 59, № 2. – С. 162–168. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-162-168>

O. V. Luksha, N. P. Krut'ko, V. M. Chernetskaya*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***RHEOLOGICAL PROPERTIES AND GROUP CHEMICAL COMPOSITION OF OXIDIZED BITUMEN
IN THE PRESENCE OF FIBROUS MATERIALS OF VARIOUS STRUCTURES**

Abstract. The rheological properties of oxidized bitumen in the presence of fibrous materials based on cellulose and chrysotile asbestos used as stabilizing additives in the production of crushed stone-mastic asphalt concrete mixtures have been studied. It has been established that the supramolecular structure of fibers characterizing the interaction between macromolecules largely determines the effectiveness of their structuring action for oxidized bitumen. Thus, the introduction of cellulose fiber leads to an increase in the ability of the bitumen colloidal structure to the simultaneous occurrence of elastic and plastic components of deformation. This is due to the uniform distribution of the fiber in the dispersion medium of bitumen due to the penetration of hydrocarbon components of bitumen into the interfibrillary space of cellulose and the rupture of hy-

drogen bonds between hydroxyl groups. The presence of strong structural bonds between chrysotile-asbestos macromolecules prevents the formation of strong reinforcing mesh in bitumen oils. As a result, the values of the structural and rheological parameters P_{k1} , P_{k2} and P_m of the bitumen/chrysotile-asbestos composition are 1.5–2 times lower compared to the values for the bitumen/cellulose composition. The results of the study of the group composition and structural-rheological properties of bitumen compositions after heating at $T = 163$ °C indicate a higher stability of the bitumen-cellulose structure to the processes of thermal oxidative degradation compared to the structure formed in the bitumen/chrysotile-asbestos composition. By the method of thin-layer chromatography, it was found that the concentration of oils in the bitumen/chrysotile-asbestos composition is higher as compared to the bitumen/cellulose composition, indicating that the weakening of rheological properties and thermal stability in the presence of chrysotile-asbestos is not related to the microstructure of its fibers, which, according to some researchers, is prone to selective diffusion of oils into the capillaries of fibrils.

Keywords: Structural and rheological properties, thermos-oxidative aging, bitumen-mastic compositions, group chemical composition

For citation. Luksha O. V., Krut'ko N. P., Chernetskaya V. M. Rheological properties and group chemical composition of oxidized bitumen in the presence of fibrous materials of various structures. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 162–168 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2023-59-2-162-168>

Введение. Особенностью щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (ЩМАС) является наличие в их составе специальных стабилизирующих добавок, которые, структурируя дисперсионную среду битума, препятствуют сегрегации ЩМАС [1]. В основном для этих целей используются органические добавки, большей частью волокна целлюлозы [2], кроме того, особое место среди стабилизаторов занимают минеральные волокнистые материалы (асбестовые отходы, хризотил и др.). Как отмечают некоторые исследователи, ЩМАС с добавками асбеста обладают повышенными показателями физико-механических свойств [3]. В отличие от целлюлозных волокон с ленточной структурой фибриллярных элементов, волокна хризотил-асбеста представляют собой тончайшие полые цилиндры, «свернутые» из листов кремнекислородных тетраэдров [4, 5]. Внешний диаметр таких цилиндров составляет 20–30 нм, внутренний – 8–10 нм. Известно, что при взаимодействии битума с минеральными пористыми материалами может протекать избирательная фильтрация компонентов битума в капилляры и поры [6]. Учитывая, что диаметр капилляров хризотил-асбеста соизмерим по величине с размерами компонентов битума, капиллярная диффузия является вполне вероятным процессом. Проникновение внутрь фибриллы наименее вязких компонентов битума может привести к «обезмасливанью» битумно-минеральной смеси и тем самым способствовать ее ускоренному старению и образованию усталостных трещин.

Цель настоящей работы – изучение влияния макро- и микроструктуры волокнистых добавок на основе хризотил-асбеста и целлюлозы на изменение группового химического состава окисленного битума и эффективность их структурирующего и термостабилизирующего действия.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования использовали битум нефтяной дорожный 70/100 по ГОСТ 33133–2014, целлюлозные волокна ARBOCEL ZZ 8–1 и волокна хризотил-асбеста А-6–30.

Изучение структурно-реологических свойств проводили с использованием ротационных вискозиметров Brookfield типа HBDV–E и «Реотест–2» при температуре 70 °C. Значения динамической вязкости вычисляли по формуле

$$\eta = \frac{P}{D} \cdot 100,$$

где η – динамическая вязкость, мПа·с; P – сдвигающее напряжение, 10^{-1} Па; D – скорость сдвига, c^{-1} .

Химический состав битума определен методом тонкослойной хроматографии с использованием аналитической системы Iatrosan МК-6S. Определение плотности и абсорбции волокнистых материалов проводили в соответствии с «ПНСТ 71-2015 Дороги автомобильные общего пользования. Материалы минеральные мелкозернистые для приготовления асфальтобетонных смесей».

Результаты и их обсуждение. С реологической точки зрения коллоидная структура битума характеризуется величиной, формой и взаимодействием ее элементов, которые в зависимости от приложенного напряжения резко меняют свои структурно-механические свойства [7, 8]. В связи с этим представляет интерес провести исследования влияния структуры волокон целлюлозы и хризотил-асбеста на ход реологических кривых течения битумных композиций (рис. 1) и значения их структурно-реологических параметров (табл. 1).

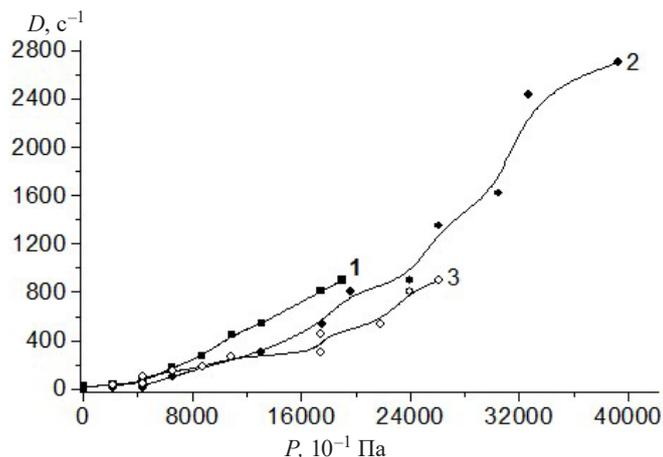


Рис. 1. Реологические кривые течения битума и его композиций: 1 – битум; 2 – битум+1 % хризотил-асбеста; 3 – битум+1 % целлюлозы

Fig. 1. Rheological flow curves of bitumen and its compositions: 1 – bitumen; 2 – bitumen+1% chrysotile asbestos; 3 – bitumen+1% cellulose

Установлено, что исследуемые волокнистые добавки обладают эффективным структурирующим действием для окисленного битума, что подтверждается повышением в несколько раз значений структурно-реологических показателей по сравнению с исходным битумом. При этом наиболее резкое увеличение прочности структурных связей в битумной композиции наблюдается при введении целлюлозного волокна (ЦВ) – значение прочности практически неразрушенной структуры P_{k1} в 5 раз превышает P_{k1} исходного битума и практически в 2 раза для композиции битум–хризотил-асбест (ХА). Кроме того, разрушение структурных связей битумной композиции в присутствии целлюлозы происходит при более высоких скоростях сдвига (D) – 2430 c^{-1} при граничном напряжении $P_m = 40216 (10^{-1} \text{ Па})$, в то время как структура композиции с хризотил-асбестом разрушается при $P_m = 26144 (10^{-1} \text{ Па})$ и $D = 900 \text{ c}^{-1}$, что свидетельствует о ее меньшей деформационной прочности.

Сравнительный анализ значений плотностей (S_d , S_s , S_a) волокнистых добавок и процента абсорбции (Абс) индустриального масла марки И-40, приведенных в табл. 2, показал, что процент абсорбции (Абс) ЦВ в 20 раз превышает этот параметр для хризотил-асбеста, что обусловлено низкими значениями их объемной плотности S_d , объемной плотности в водонасыщенном, поверхностно-сухом состоянии S_s и максимальной плотности S_a – в 4,0, 5,9 и 2 раза соответственно.

Углеводородные компоненты битума, проникая в межфибрилярное пространство целлюлозы, легко разрывают водородные связи между гидроксильными группами, вследствие чего они равномерно распределяются в дисперсионной среде битума. При этом образуется прочная

Т а б л и ц а 1. Структурно-реологические параметры битума и битумно-мастичных композиций при $70 \text{ }^\circ\text{C}$

T a b l e 1. Structural and rheological parameters of bitumen and bitumen-mastic compositions at $70 \text{ }^\circ\text{C}$

Образец	$P_{k1}, (10^{-1} \text{ Па})$	$P_{k2}, (10^{-1} \text{ Па})$	$P_m, (10^{-1} \text{ Па})$
Битум	830	2500	13000
Битум +1 % ЦВ	4357	26453	40216
Битум+1 % ХА	2171	16732	26144

Т а б л и ц а 2. Результаты определения плотностей стабилизирующих добавок и процент абсорбции масла

T a b l e 2. The results of determining the densities of stabilizing additives and the percentage of oil absorption

Образец / Показатель	$S_d, \text{ г/см}^3$	$S_s, \text{ г/см}^3$	$S_a, \text{ г/см}^3$	Абс, %
Добавка на основе хризотил-асбеста	2,371	1,015	2,681	4,87
Добавка на основе целлюлозных волокон	0,581	0,171	1,355	97,97

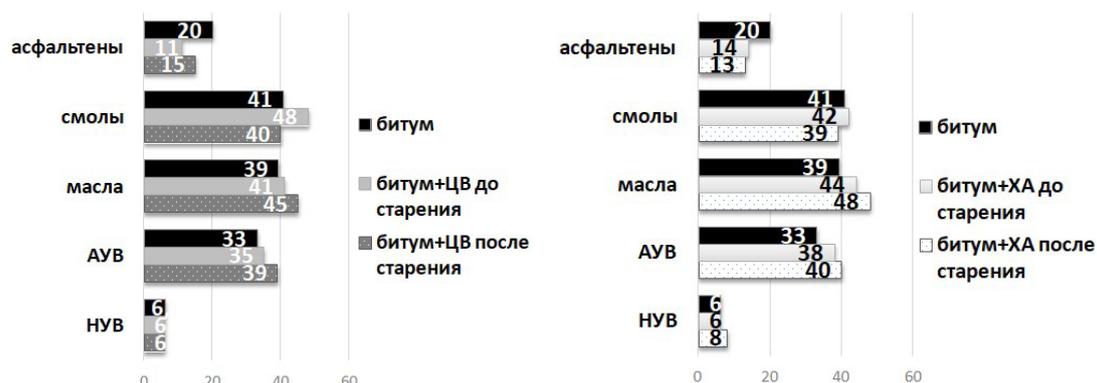


Рис. 2. Результаты группового химического анализа

Fig. 2. Results of group chemical analysis

армирующая сетка, способная под воздействием нагрузки к одновременному возникновению упругой и пластической составляющих деформации, характеризуемых показателем P_{k2} . Волокна хризотил-асбеста состоят из огромного количества элементарных кристаллов (волоконец), оси волоконности которых хотя и взаимно параллельны, но относительно этой оси повернуты под произвольными углами. Наличие более прочных структурных связей между макромолекулами хризотил-асбеста препятствует равномерному его распределению в дисперсионной среде битума. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что надмолекулярная структура волокон, характеризующая взаимодействие между макромолекулами, в значительной степени определяет эффективность их структурирующего действия для окисленного битума.

Под влиянием поверхностных сил на поверхности агрегатов микрофибрилл происходит адсорбция асфальтенов, вследствие чего наблюдается изменение группового химического состава битума (рис. 2), причем в присутствии целлюлозы процесс адсорбции асфальтенов происходит более интенсивно. Методом тонкослойной хроматографии определен химический состав битума после его отфильтровывания при $T = 160\text{ }^\circ\text{C}$ из битумно-мастичных композиций (рис. 2), содержащих стабилизирующие добавки в количестве, рекомендованном к использованию (приложение Б ГОСТ 31015) при проектировании ЦМАС.

Установлено, что концентрация асфальтенов в битуме при использовании целлюлозы уменьшается на 9 %, а хризотил-асбеста только на 6 %, при этом содержание масел в композиции битум–хризотил-асбест на 3 % выше по сравнению с битумно-целлюлозными композициями. Этот факт позволяет сделать предположение, что диффузии масел в капилляры фибрилл хризотил-асбеста не происходит. Полученные данные коррелируют с результатами сравнительного анализа значений измерения вязкости неразрушенной структуры битума и битумно-мастичных композиций (рис. 3). Идентичность хода кривых зависимости вязкости от скорости сдвига для битума и композиции битум–хризотил-асбест в области низких деформаций (для неразрушенной структуры) η_0 свидетельствует об отсутствии избирательной диффузии волокнами хризотил-асбеста, поскольку снижение содержания масла в системе привело бы к повышению вязкости и снижению упруго-пластических свойств битума [9].

В процессе термоокислительного старения ($T = 163\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 ч) количество асфальтенов в композиции битум–хризотил-асбест практически не изменяется (14 % – до старения и 13 % – после термоокисления), а в присутствии целлюлозных волокон увели-

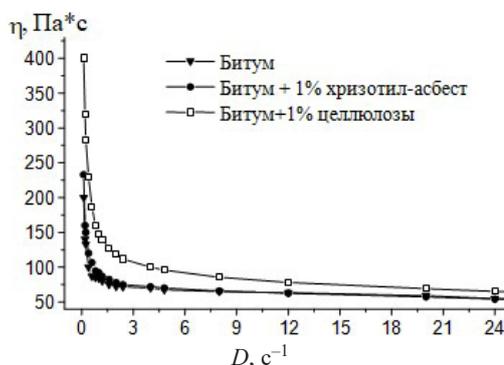


Рис. 3. Зависимости вязкости от скорости сдвига для битума и композиции битум–хризотил-асбест в области низких деформаций

Fig. 3. Dependence of viscosity on shear rate for bitumen and bitumen–chrysotile-asbestos compositions in the area of low deformations

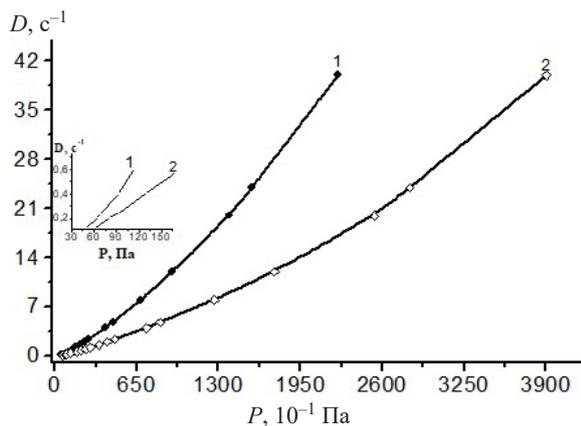


Рис. 4. Реологические кривые течения композиции битум–целлюлоза: 1 – до термоокисления; 2 – после термоокисления

Fig. 4. Rheological flow curves of the bitumen–cellulose composition 1 – before thermal oxidation; 2 – after thermal oxidation

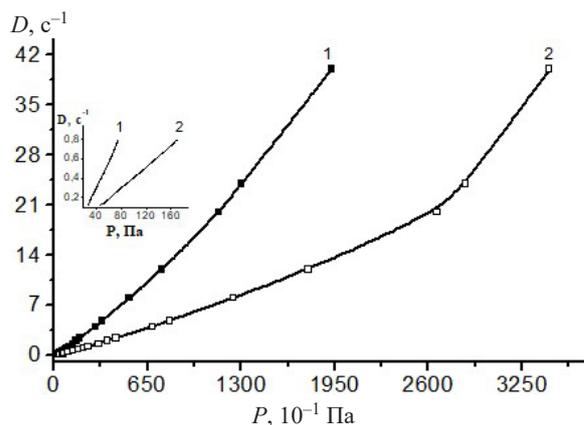


Рис. 5. Реологические кривые течения композиции битум–хризотил-асбест: 1 – до термоокисления; 2 – после термоокисления

Fig. 5. Rheological flow curves of bitumen–chrysotile–asbestos composition: 1 – before thermal oxidation; 2 – after thermal oxidation

чивается на 4 %, что обусловлено переходом в них смол. Как следствие, наблюдается повышение отношения асфальтенов к сумме смол и масел от 0,12 до 0,17. В качестве количественной оценки структурных изменений битумных композиций после термоокислительного старения использовали рассчитанные значения динамической вязкости битума и битумных композиций после старения (рис. 4, 5, табл. 4).

Т а б л и ц а 4. Значения динамической вязкости битума и битумных композиций при 70 °С

Table 4. Values of dynamic viscosity of bitumen and bitumen compositions at 70 °С

Образец	η_0^* , Па·с до старения	η_0^* , Па·с после старения	$\frac{\eta_0^* \text{ до старения}}{\eta_0^* \text{ после старения}}$
Битум	200,0	300,0	1,5
Битум–целлюлоза	400,0	500,0	1,25
Битум–хризотил-асбест	233,0	400,0	1,72

Установлено, что в присутствии волокон целлюлозы повышение динамической вязкости в процессе старения происходит менее интенсивно, чем у исходного битума и у композиций с хризотил-асбестом. Отношения значений динамической вязкости $\frac{\eta_0^* \text{ до старения}}{\eta_0^* \text{ после старения}}$ располагаются в ряду битум–целлюлоза < битум < битум–хризотил-асбест. Этот факт свидетельствует о том, что сформированная битумно-целлюлозная структура обладает не только высокой устойчивостью к воздействию сдвигающих деформаций, но проявляет высокую стабильность к термоокислительному старению. Результаты исследования группового химического состава битума, выделенного из битумно-мастичных композиций (рис. 2), свидетельствуют, что в присутствии целлюлозного волокна процесс адсорбции асфальтенов из битума происходит интенсивнее, чем в присутствии хризотил-асбеста, что обуславливает более существенное снижение содержания асфальтенов в дисперсионной среде битума и, как следствие, ослабление их способности к коалесценции и повышение стабильности к термоокислительной деструкции.

По результатам анализа группового состава композиции битум–хризотил-асбест можно заключить, что микроструктура волокон хризотил-асбеста не является причиной структурной нестабильности битумно-мастичной композиции, поскольку уменьшение содержания низкомолекулярных компонентов (масел) в составе битума не наблюдается, соответственно их диффузии внутрь фибрилл хризотил-асбеста не происходит. Термоокислительная нестабильность компо-

зиции битум–хризотил-асбест, вероятно, может быть обусловлена наличием загрязняющих минеральных примесей, среди которых выделяют оксиды железа, алюминия и кальция. Наиболее отрицательно могут влиять на физико-механические свойства хризотил-асбеста карбонаты кальция, которые, цементируя элементарные кристаллы, вызывают увеличение их агрегатной связности, снижение эластичности и, как следствие, нестабильность к термоокислительному старению битумной композиции с хризотил-асбестом.

Заключение. Установлено, что эффективность структурирующего действия волокнистых стабилизирующих добавок в значительной степени определяется их надмолекулярной структурой. В присутствии целлюлозных волокон битумно-мастичная композиция обладает повышенной способностью к одновременному возникновению упругой (обратимой) и пластической (необратимой) составляющих деформации вследствие приложения нагрузки. Это повышает эффективность стабилизации избыточного битума в составе ЩМАС, не позволяя ему истекать из смеси, предотвращать расслаивание асфальтобетонной смеси в процессе приготовления, транспортировки и укладки, повышать устойчивость ЩМАС к сдвиговым деформациям.

Методами тонкослойной хроматографии установлено, что концентрация масел в битуме при использовании хризотил-асбеста на 3 % выше по сравнению с битумно-целлюлозными композициями, что свидетельствует об отсутствии диффузии масел в капилляры фибрилл хризотил-асбеста. Полученные данные коррелируют с результатами сравнительного анализа значений измерения вязкости неразрушенной структуры битума и битумно-мастичными композициями.

На основании анализа результатов исследования группового состава битума и структурно-реологических свойств битумных композиций после прогрева при $T = 163$ °С в течение 5 ч установлено, что сформированная битумно-целлюлозная структура обладает не только высокой устойчивостью к воздействию сдвигающих деформаций, но и проявляет высокую стабильность к термоокислительной деструкции по сравнению с композицией битум–хризотил-асбест. Установлено, что микроструктура волокон хризотил-асбеста не оказывает негативного влияния на стабильность композиции битум–хризотил-асбест к термоокислительной деструкции.

Список использованных источников

1. Соломенцев, А. Б. Оценка битумоудерживающей способности стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичного асфальтобетона в асфальтовяжущем / А. Б. Соломенцев, И. А. Баранов // Строительство и реконструкция. – 2010. – №4 (30). – С. 53–58.
2. Лукша, О. В. Структурно-реологические свойства целлюлозно-битумных композиций / О. В. Лукша // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2005. – № 5. – С. 66–68.
3. Смирнов, М. М. Асфальтобетонные смеси с добавкой асбоволокна / М. М. Смирнов // Автомобильные дороги. – 1991. – № 1. – С. 18–19.
4. Микроструктура целлюлозы и ее изучение методом релаксации ЯМР / Ю. Б. Грунин [и др.] // Высокомолекулярное соединение. Сер. А. – 2012. – Т. 54, № 3. – С. 397–405.
5. Урюпин, О. Н. Структура нанопроволок InSb в каналах хризотилового асбеста / О. Н. Урюпин, Н. Ф. Картенко, Н. Ю. Табачкова // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, вып. 7. – С. 1002–1006.
6. Лукашевич В. Н. Увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий за счет двухстадийного введения органических связующих в процессе производства асфальтобетонных смесей / В. Н. Лукашевич // Строительные материалы. – 2003. – № 1. – С. 24–25.
7. Dialer, K. Über die Beziehung von molekulargewicht und viskosität bei polyvinylacetaten / K. Dialer, W. Stabentheiner // Die Makromolekulare Chemie. – 2003. – Vol. 2, iss. 3. – P. 271–278. <https://doi.org/10.1002/macp.1948.020020305>
8. Rheological analysis of bitumens by shear rheometer: effect of the thermal history on the results / V. Mouillet [et al.] // Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Held Vienna, May 2004. – Vienna, 2004. – Vol. 2. – С. 1411–1420.
9. Прогнозирование старения полимерных композиционных материалов / С. И. Иванов [и др.] // Журн. прикл. химии. – 2006. – Т. 79, вып. 10. – С. 1731–1733.

References

1. Solomentsev A. B., Baranov I. A. Estimate of the asphalt-restraining capacity in stabilizing additives for macadam-mastic bituminous concrete in asphalt-binding one. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya = Building and reconstruction*, 2010, no. 4 (30), pp. 53–58 (in Russian).
2. Luksha O. V. Structural and rheological properties of cellulose-bitumen compositions. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2005, no. 5, pp. 66–68 (in Russian).

3. Smirnov M. M. Asphalt concrete mixtures with the addition of asbestos fiber. *Avtomobil'nye dorogi* [Highways], 1991, no. 1, pp.18–19 (in Russian).
4. Grunin Yu. B., Grunin L. Yu., Nikol'skaya E. A., Talantsev V. I. Microstructure of cellulose: NMR relaxation study. *Polymer science. Series A*, 2012, vol. 54, no. 3, pp. 201–208. <https://doi.org/10.1134/s0965545x12030030>
5. Uryupin O. N., Kartenko N. F., Tabachkova N. Yu. On the structure of InSb nanowires in the channels of chrysotile asbestos. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 7, pp. 974–978. <https://doi.org/10.1134/s1063782614070215>
6. Lukashevich V. N. Increasing the service life of asphalt concrete coatings by the two-stage introduction of organic binders in the production of asphalt concrete mixtures. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials Russia*, 2003, no. 1, pp. 24–25 (in Russian).
7. Dialer K., Stabentheiner W. Über die Beziehung von molekulargewicht und viskosität bei polyvinilacetaten. *Die Makromolekulare Chemie*, 2003, vol. 2, pp. 271–278. <https://doi.org/10.1002/macp.1948.020020305> (in German).
8. Mouillet V., Lapalu L., Planche J. P., Durrieu F. Rheological analysis of bitumens by dynamic shear rheometer: effect of the thermal history on the results. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress Held Vienna, May 2004. Vol. 2. Vienna, 2004*, pp. 1411–1420.
9. Ivanov S. V., Trachevskii V. V., Titova O. S., Zozulya L. A. Prognostication of aging of polymeric composite materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2006, vol. 79, iss. 10, pp. 1712–1714. <https://doi.org/10.1134/s1070427206100326>

Информация об авторах

Лукша Ольга Валерьевна – канд. хим. наук., зав. лаб. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga.l-75@mail.ru

Крутько Николай Павлович – академик, зав. отделом. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Чернецкая Виктория Мечеславовна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: maverick119@tut.by

Information about the authors

Luksha Olga V. – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga.l-75@mail.ru

Krut'ko Nicolay P. – Academician, Head of the Department. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Chernetskaya Viktoria M. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: maverick119@tut.by