

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-16-26

*\*Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В.**Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет**\*E-mail: SHestakovNI@mgsu.ru*

## ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ БЕТОНОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность снижения атмосферной экологической нагрузки автомобильных дорог путем нанесения на акустические экраны составов, обладающих фотокаталитическими свойствами. Установлено, что количество оксидов азота на территории города Москвы превышает нормы ПДК, в связи с чем предложен потенциальный способ снижения уровня среднесуточной и максимально разовой ПДК оксидов азота при использовании покрытий традиционных акустических экранов фотокаталитическими составами. В качестве фотокаталитического агента рассматривается диоксид титана в анатазной форме. Для снижения плотности и повышения пористости цементных составов вводится целлюлозная суспензия, полученная методом насыщения в водной среде с последующей гомогенизацией. Исследовано влияние целлюлозы в рассматриваемых цементных системах в комплексе с фотокаталитическим агентом. Методом математического планирования составлен двухфакторный композиционный эксперимент, в результате анализа которого установлены параметры влияния добавок диоксида титана и целлюлозы на прочность, плотность и водопоглощение изучаемых композитов. Исследование структуры полученных композитов показывает, что  $TiO_2$  в основном располагается на поверхности целлюлозных волокон, что теоретически повышает полезную поверхность для фотокаталитических реакций и как следствие итоговую эффективность составов.

**Ключевые слова:** акустические экраны, автомобильные дороги, окружающая среда, фотокаталитические материалы, цементные композиты, диоксид титана, целлюлозные волокна.

**Введение.** Одним из главных приоритетов современного общества является поддержание и улучшение качества окружающей среды. По мере развития человечества происходит увеличение площадей занимаемых городами, которое закономерно сопровождается нарастанием протяженности автомобильных дорог, что, в свою очередь, ведет к интенсивному загрязнению атмосферного воздуха.

По данным экологического мониторинга [1] Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, загрязнение воздуха на территории мегаполиса является весьма неоднородным и имеет локальные участки. Среди наиболее концентрированных очагов загрязнения активно выделяются автомобильные дороги с высокой интенсивностью движения и прилегающие к ним территории. При этом на значения удельных выбросов загрязняющих веществ для автомобильных дорог большое влияние оказывает тот факт, что в городских условиях автомобиль на участках дорог с малой интенсивностью постоянно совершает разгоны и торможения, увеличивая тем самым количество выбросов. На жилых территориях содержание загрязняющих веществ в среднем в 1,2 раза ниже, чем в центре Москвы, и почти в 1,5 раза, чем вблизи автотрасс.

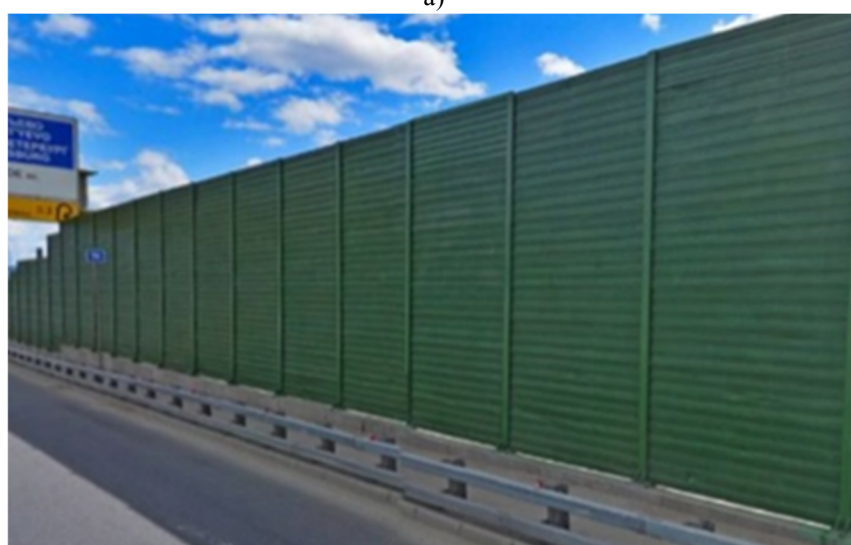
Полностью исключить отрицательное воздействие автомобильного транспорта на состояние атмосферы невозможно, но снизить негативное воздействие вполне реально. Одной из наиболее перспективных технологий является применение на участках с повышенным содержанием оксидов азота специальных материалов, обладающих фотокаталитическими свойствами.

В настоящее время многими учеными предложено большое количество вариантов применения фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве. Их использование предлагается для устройства верхних слоев покрытий автомобильных дорог [2-4] или для устройства автодорожных тоннелей [5]. Тем не менее, существуют некоторые элементы автомобильных дорог, эффективность которых, в виду их конструктивного решения, будут значительно выше для фотокатализа, как, например, акустические экраны.

Типовой акустический экран представляет собой сборную конструкцию, которая состоит из фундамента, несущей конструкции и панелей. На участках Московской кольцевой автомобильной дороги (МКАД) установлены такие экраны, основная функция которых отстранить негативное воздействие от автомобильной дороги на жилые участки. Акустические экраны могут быть отражающими или отражающе-поглощающими в зависимости от применяемых материалов и конфигурации составных панелей (рис. 1).



а)



б)



в)

Рис. 1. Акустические экраны из различных материалов, установленные на МКАД:  
а) железобетонные, б) металлические, в) полимерные

Сумма полезной площади участков акустических экранов, обращенные к автомобильной дороге, на дороге протяженностью 108,9 км со-

ставляет 77039 м<sup>2</sup>. Из них полезная площадь акустических экранов, выполненных из железобетона, составляет – 23040 м<sup>2</sup>, что составляет почти

30 % от общей площади. В качестве объекта исследований рассматриваются только железобетонные акустические экраны, так как их поверхностная обработка является наиболее рациональной за счет родства структур «бетон - цементная композиция», а нанесение цементных составов на металлические и полимерные поверхности считается технологически сложной и не эффективной.

За счет выполнения поверхностной обработки железобетонных акустических экранов составами с фотокаталитическими свойствами, предполагается потенциальное снижение количества оксидов азота и, как следствие, уменьшения нагрузки на атмосферу, вблизи автомобильной дороги. Таким образом, целью данного исследования является разработка и исследования цементных составов для акустических экранов автомобильных дорог с комплексным применением диоксида титана и целлюлозы.

**Материалы и методы.** Для изучения влияния количества добавок в цементной композиции на свойства фотокаталитических составов использовался портландцемент марки ЦЕМ I 32,5Н. В качестве фотокаталитической добавки применялся наиболее распространенный и общедоступный катализатор – диоксид титана, с насыпной плотностью 760 кг/м<sup>3</sup> и удельной поверхностью 480 м<sup>2</sup>/кг.

Проведение качественного и количественного фазового анализа фотокаталитической добавки проводилось на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA методом порошковой рентгеновской дифракции. Результаты анализа приведены в таблицах 1 и 2. Выполненный анализ исследуемой фотокаталитической добавки показал наличие кристаллов TiO<sub>2</sub> с тетрагональной сингонией в виде анатазной модификации – 98,3 % и рутильной – 1,7 %.

Таблица 1

**Химический состав (по элементам) фотокаталитической добавки**

Элементы	Ti	O	V	Si	P	Ca	K	Al	Другие
Содержание, %	58,85	40,11	0,31	0,17	0,14	0,13	0,01	0,07	0,21

Таблица 2

**Химический состав (по оксидам) фотокаталитической добавки**

Оксиды	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Другие
Содержание, %	97,96	0,56	0,37	0,32	0,18	0,17	0,13	0,31

Фотокаталитическая добавка содержит в своем составе оксиды кремния и алюминия, которые являются веществами поверхностного покрытия. Известно, [6-8] что при использовании TiO<sub>2</sub> в качестве белого пигмента нежелательные фотокаталитические реакции, генерируемые при поглощении УФ-излучения, приводят к разложению пигментированного материала. При этом TiO<sub>2</sub> поглощает свет в ближней ультрафиолетовой области, что приводит к возникновению пары электрон-дырка, которая генерирует на поверхности оксида свободные радикалы с высокой реакционной способностью. Производители TiO<sub>2</sub> снижают его фотоактивность за счет обработки SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые в дальнейшем могут смываться с поверхности зерен диоксида титана при механическом воздействии в водной среде.

Главным ограничением использования TiO<sub>2</sub> в качестве фотокатализатора является то, что его действие проявляется лишь при облучении ближним УФ-диапазоном с длиной волны менее 388 нм, что приблизительно равно всего 5 % солнечного спектра, достигающего поверхности Земли [9-11]. В связи, с чем встает необходимость корректировки модифицирующих компонентов для TiO<sub>2</sub>, при которых происходит увеличения его активности в УФ-облучении. Известны способы

[12-16] повышения эффективности TiO<sub>2</sub> за счет обработки его поверхности оксидом кремния, а так как SiO<sub>2</sub> присутствует в составе минеральных вяжущих, это дополнительно будет способствовать усилению фотокаталитической активности.

Эффективность фотокаталитических процессов зависит от нескольких факторов, наиболее значимым из которых является площадь поверхности, участвующей в этих процессах. В связи, с чем для повышения площади поверхности реакции фотокатализа вводили целлюлозную суспензию, полученную методом механической гомогенизации вторичной целлюлозы в водной среде. Длина исследуемых волокон не превышает 3 мм. Диаметр целлюлозных волокон после насыщения водой составляет 10-40 мкм (рис. 2 а). Диаметр целлюлозных волокон после потери части водной среды значительно уменьшается и находится в диапазоне 3-10 мкм (рис. 2 б).

Снимки были получены методом оптической микроскопии с помощью Комплекса оптической микроскопии Nikon Eclipse MA200 (с возможностью цветокоррекции и интегрированной виртуальной линейки. Максимальное увеличение 2000 крат).

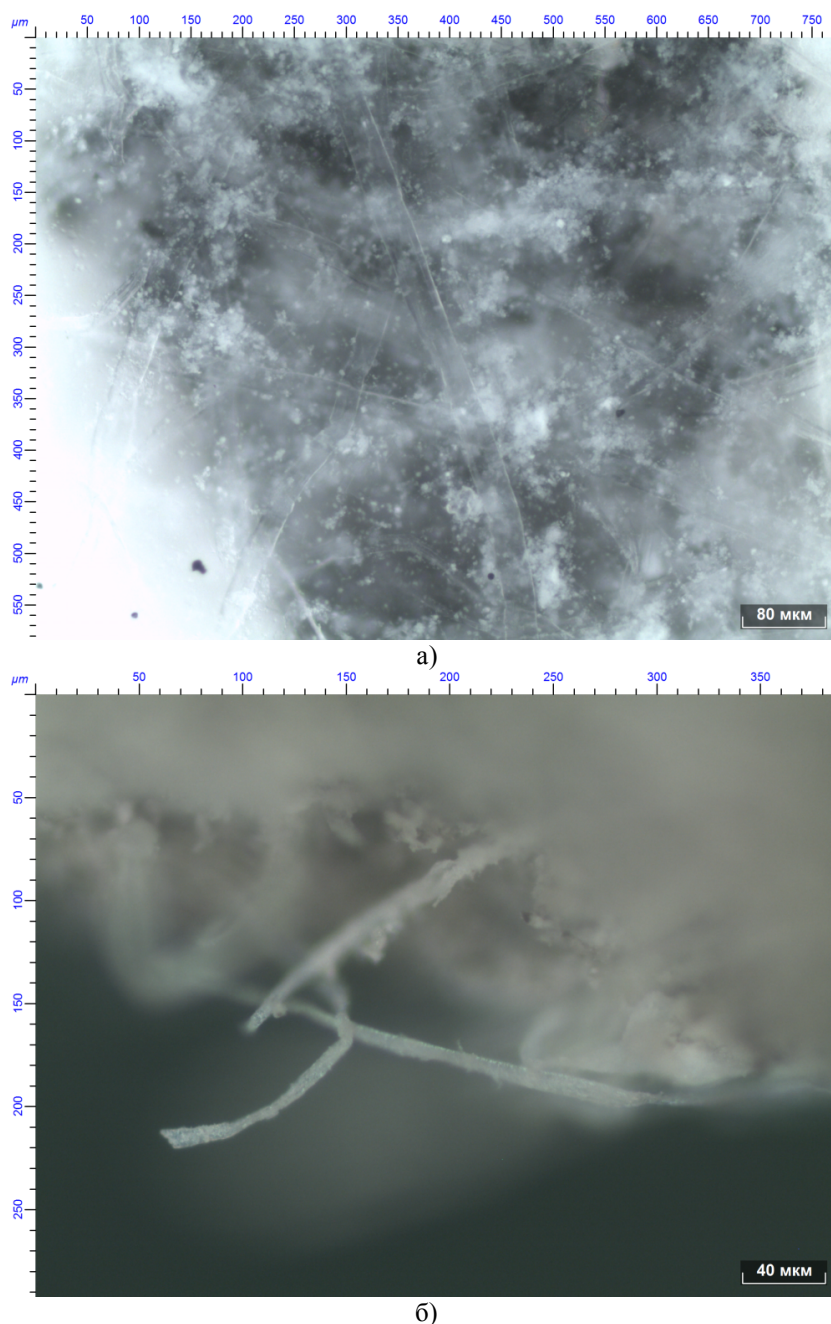


Рис. 2. Микрофотоснимок целлюлозных волокон:

а) в насыщенном водой состоянии (в суспензии), б) в структуре цементного камня в возрасте 28 суток.

Известно [17, 18], что вода разрушает слабые водородные связи в целлюлозе и вызывает её набухание в водной среде. Такие процессы ведут к увеличению удельной поверхности целлюлозы, увеличению общего объема пор и их размеров, а также количества свободных гидроксильных групп, что положительно сказывается на их реакционной способности. Межфбрилярное и межкристаллитное набухание целлюлозы в воде приводит к образованию более развитой поверхности целлюлозных волокон, что приведет к образованию крупных пор в структуре полученного композита.

Определение плотности проводилось согласно ГОСТ 12730.1-78 «Бетон. Методы определения плотности». Определение водопоглощения

проводилось по требованиям ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения». Определение прочности проводилось согласно ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

**Основная часть.** Для установления верхней границы варьирования количества добавок диоксида титана и целлюлозы посредством планирования эксперимента был составлен двухфакторный композиционный ротатбельный эксперимент. В качестве факторов были выбраны:  $X_1$  – количество фотокаталитической добавки по отношению к массе портландцемента;  $X_2$  – количество целлюлозы (в сухом веществе) по отношению к массе портландцемента. Основные уровни факторов  $X_1$  и  $X_2$  – 1,0 и 0,75, а шаг варьирования

– 0,5 и 0,25, соответственно. В качестве функции отклика рассматривается предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток.

Изменение средней плотности и величины водопоглощения косвенно характеризуют параметры пористости полученных композитов, что в

свою очередь сказывается на площади поверхности для проведения фотокаталитических реакций. Поэтому для установления зависимости пористости от состава полученных композитов фиксировались показатели плотности и водопоглощение.

Таблица 1

Составы и свойства композиционных вяжущих

№ состава	Кодовая матрица		Содержание добавок, % от массы ПЦ		Выходные параметры		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Целлюлоза	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа	Водопоглощение по массе, %
К	-	-	0	0	2064	93,5	5,3
1	-1	-1	0,5	0,5	2129	99,7	4,8
2	+1	-1	1,5	0,5	2069	101,5	4,6
3	-1	+1	0,5	1	2057	74,9	4,4
4	+1	+1	1,5	1	2054	68,7	4,7
5	-1,42	0	0,3	0,75	2036	85,3	3,0
6	+1,42	0	1,7	0,75	2005	87,7	3,2
7	0	-1,42	1	0,4	2048	93,4	4,8
8	0	+1,42	1	1,1	2026	55,9	4,6
9	0	0	1	0,75	2073	75,5	4,8

На основе полученных результатов лабораторных испытаний цементного камня с различ-

ным содержанием TiO<sub>2</sub> и целлюлозы искомая зависимость функции отклика имеет следующий вид:

$$R_{сж} = 75,43 - 0,12X_1 - 13,75X_2 - 1,89 X_1X_2 + 6,95 X_1^2 + 0,98 X_2^2. \quad (1)$$

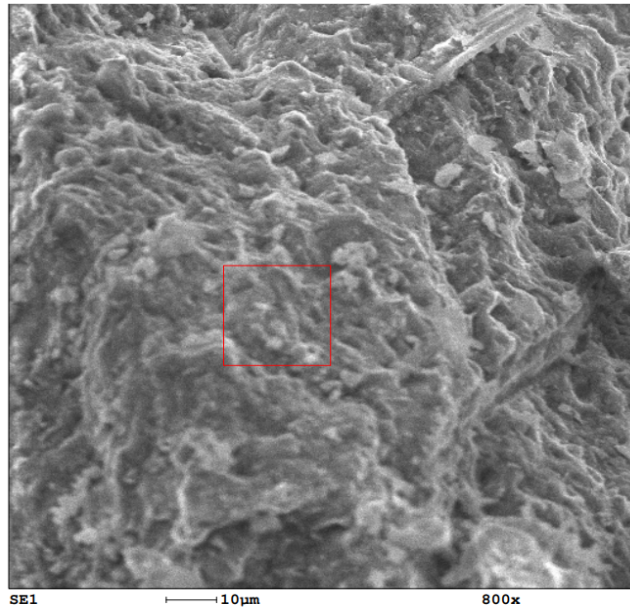
Полученное уравнение регрессии показывает незначительное влияние диоксида титана на снижение прочности. Варьирование количеством целлюлозы значительнее сказывается на прочности композиционных образцов, снижая ее при максимальной концентрации добавки почти на 40 % относительно контрольного образца. При содержании целлюлозы свыше 0,75 % происходит ее агрегация в свободном состоянии, что приводит к снижению плотности и прочности полученных композитов. Волокна целлюлозы, набухая, впитывают значительное количество воды, тем самым увеличивая вязкость цементного теста. Затем, в процессе твердения вяжущего, вода отделяется из набухшей целлюлозы за счет диффузионных процессов и способствует образованию концентрированных пор в составе композита. Диоксид титана, в свою очередь, являясь водонерастворимым компонентом, снижает показатель водопоглощения за счет заполнения капиллярных пор, что объективно коррелирует с данными проведенного математического планирования эксперимента.

Формирование структуры цементного камня, величина общей пористости, а также параметры капиллярно-пористой структуры зависят не только от величины водовяжущего отношения и степени гидратации [19], но и от вида

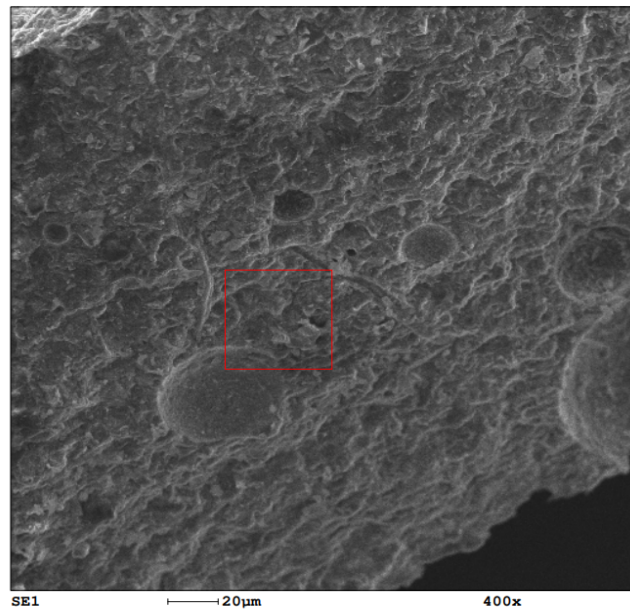
микронаполнителей, которым является добавленная целлюлоза. Для изучения морфологии модифицированного цементного камня была изучена микроструктура вяжущего в возрасте 28 суток на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 250.

Микроструктура цементного камня (рис. 3) характеризуется наличием в микропорах развитых новообразований гидросиликатов кальция, которые способствуют повышению плотности. Диоксид титана в кристаллической форме в этом случае присутствует на сколах при исследовании поверхности на всех участках, однако его количество значительно уступает элементам продуктов гидратации портландцемента. Образованию крупных кратерообразных пор на сколе цементного камня объясняется межфибрилярным и межкристаллитным набуханием целлюлозы в воде, что приводит к образованию более развитой поверхности целлюлозных волокон.

С помощью рентгеновского спектрометра, которым оснащен растровый электронный микроскоп, получен микроанализ элементов (рис. 4), находящихся в структуре цементного камня. Выполненный элементный анализ подтверждает предложенные предположения о взаимодействии компонентов модифицированной цементной системы.



а)



б)

Рис. 3. Микрофотоснимок цементного камня с добавками в возрасте 28 суток:  
а) 10 мкм, б) 20 мкм

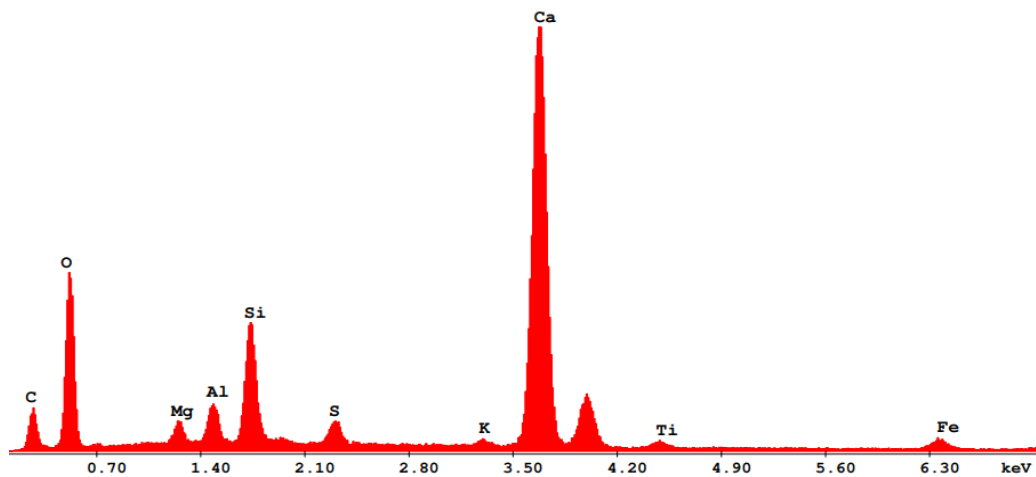


Рис. 4. Элементный микроанализ поверхности модифицированного цементного камня

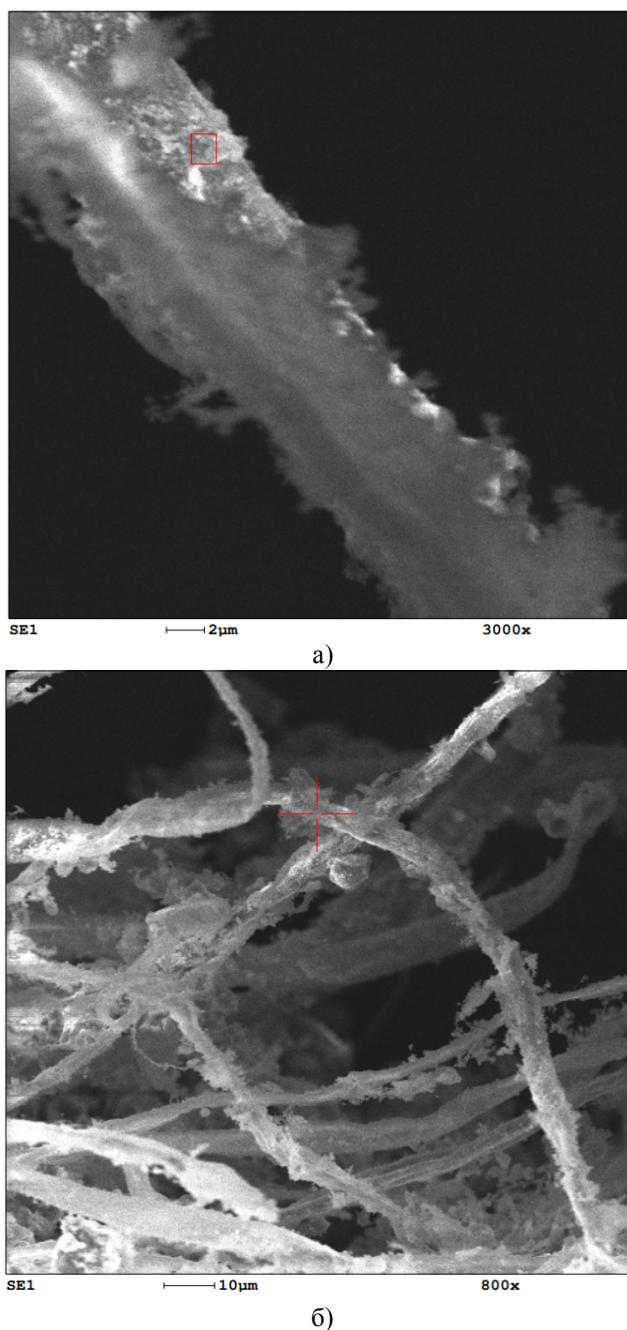


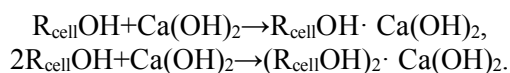
Рис. 5. Микрофотоснимок волокон целлюлозы в составе цементного камня:  
а) 2 мкм, б) 10 мкм

По теоретическим и экспериментальным данным авторов [16] установлено, что целлюлозные макромолекулы имеют сильную тенденцию к агрегированию в высокоупорядоченные структурные элементы благодаря своему химическому строению, спиральной конформации и стереорегулярности.

Высокая удельная поверхность волокон целлюлозы является значительным фактором при заполнении капилляров, пор и сорбции молекул из водных сред, за счет чего приводит ее набуханию. Изменение размеров и формы волокон целлюлозы обуславливается межфибриллярным и внутрифибриллярным набуханием целлюлозы и включает три основных момента: заполнение жидкостью капиллярного пространства между

фибриллами, заполнение пор на поверхности волокон и взаимодействие жидкости с макромолекулами целлюлозы.

Из микроснимков (рис. 5) видно, что на поверхности волокон целлюлозы располагаются минеральные вещества, которые образовались в процессе гидратации портландцемента. Известно [20], что гидроксид кальция, взаимодействуя с поверхностным слоем целлюлозы, присоединяется к гидроксильным группам целлюлозы с образованием аддитивных или молекулярных соединений по схеме:



Такие соединения образуются в результате взаимодействия в стехиометрических соотношениях двух компонентов за счет межмолекулярных связей, в частности водородных. Таким образом, целлюлоза образует с гидроксидом кальция  $(C_6H_{10}O_5)_2 \cdot Ca(OH)_2$  и  $(C_6H_{10}O_5) \cdot Ca(OH)_2$ . Подобные соединения известны для других многоатомных спиртов: глицерина, маннита и простых сахаров.

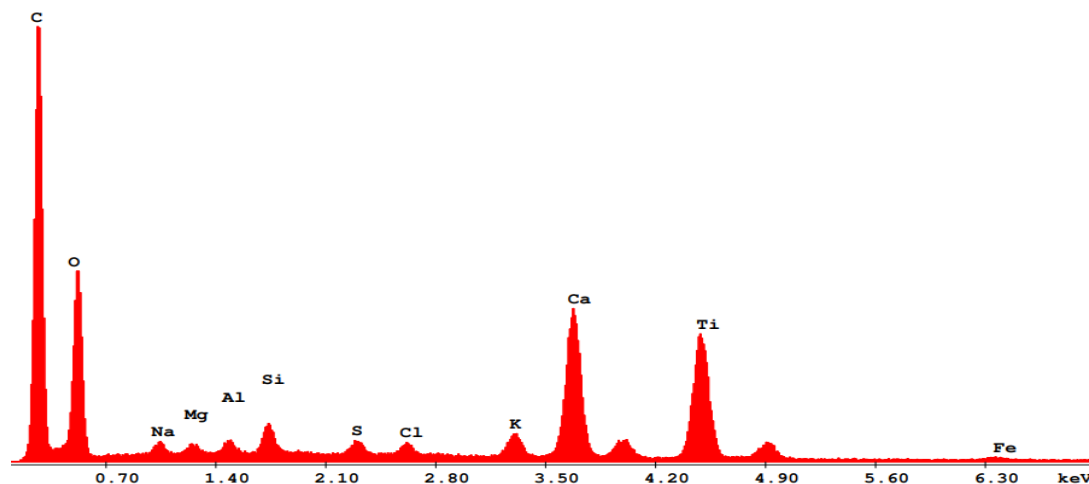


Рис. 6. Элементный микроанализ поверхности волокон целлюлозы в цементном камне

#### Выводы.

1. По приведенным результатам исследований установлено, что прочность, плотность и водопоглощение полученных композитов в большей степени зависит от количества введенной целлюлозной суспензии и в меньшей от количества  $TiO_2$ .

2. При исследовании структуры композитов установлено, что диоксид титана сорбируется на поверхности набухших волокон целлюлозы и остается там после процессов гидратации. Вследствие повышения пористости цементного камня увеличивается потенциальная полезная площадь поверхности для проведения фотокаталитических реакций.

При условии замены существующих акустических экранов на фотокаталитические произойдет снижение экологической нагрузки на воздушный бассейн МКАД и повлияет на снижение уровня ПДКс.с. по оксидам азота до допустимого уровня.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каргаполов Н.В. Технология оценки загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом. // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 10-4 (56). С. 351–356.

В связи со способностью волокон целлюлозы набухать в жидкостях, поверхность фибрилл целлюлозы становится более доступной для микрочастиц, которые равномерно распределяются внутри волокон. Выполненный микроанализ компонентов (рис. 6) показывает, что кроме образовавшегося гидроксида кальция, присутствует диоксид титана.

2. Ляпидевская О.Б., Фрайнт М.А. Фотокаталитический бетон для дорожного строительства // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 125–130.

3. Li H., Zhang M. H., Ou J. P. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement // Wear. 2006. Vol. 260. № 11–12. Pp. 1262–1266.

4. Sija A., Tongrong D., Hao D., Ying Ch., Wanting Ch. Preparation of nano- $TiO_2$ -coated  $SiO_2$  microsphere composite material and evaluation of its self-cleaning property // Nanomaterials. 2017. Vol. 7. № 11. 367 p.

5. Слесарев М.Ю., Попов К.В. Исследование эффективности применения фотокаталитических бетонов в городском строительстве // Современное строительство и архитектура. 2017. №3 (07). С. 18–20.

6. Ханова Е.А., Коробочкин В.В. Исследование параметров пористой структуры диоксида титана, полученного электрохимическим синтезом на переменном токе // Известия ТПУ. 2003. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-poristoy-struktury-dioksida-titana-poluchennogo-elektrohimicheskim-sintezom-na-peremennom-toke> (дата обращения: 15.07.21).11.20

7. Васильева К.Л., Ищенко О.М., Захарова Н.В., Малков А.А., Малыгин А.А. Изучение фа-



зовых превращений в поверхностном слое диоксида титана // Журн. прикл. химии. 2009. Т. 82, Ч. 5. С. 731–736.

8. Пат. 2367673С2, Российская Федерация, МПК С 09 С1/36. Способ обработки диоксида титана и пигмент на его основе/ Блюмель З.; заявитель и патентообладатель Кронос Интернациональ, Инк. (DE). №2007107491; заявл. 08.07.2005; опубл. 20.09.2020.

9. Хела Р., Боднарлова Л. Исследование возможности тестирования эффективности фотокатализа  $TiO_2$  в бетоне // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 77–81.

10. Кузьмичёва Г.М. Наноразмерные системы с оксидами титана(IV). Получение. Характеризация. Свойства // Тонкие химические технологии. 2015. Т. 10. № 6. С. 5–36.

11. Поживина К.А. Новые фотокаталитические нанодобавки на основе диоксида титана и диоксида кремния для самоочищающихся бетонов // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11. № 3-4. С. 145-151.

12. Вахрушев А.Ю., Крайнов Д.С., Бойцова Т.Б., Горбунова В.В., Пак В.Н. Фотокаталитические свойства материалов на основе оксида титана(IV) и наночастиц серебра // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. №2. С. 282–289.

13. Беликов М.Л., Седнева Т.А., Локшин Э.П. Адсорбционные и фотокаталитические свойства диоксида титана, модифицированного вольфрамом // Неорганические материалы. 2021. Т. 57. № 2. С. 154-162.

14. Садовников А.А., Нечаев Е.Г., Бельтюков А.Н., Гаврилов А.И., Макаревич А.М., Бойцова

О.В. Мезокристаллы диоксида титана. Рабочая поверхность в фотокаталитических реакциях // Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 4. С. 432–439.

15. Yu X., Kang S., Long X. Compressive strength of concrete reinforced by  $TiO_2$  nanoparticles // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2036. № 030006. Pp. 1–5.

16. Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнир Е.Ю. Микроразмерная целлюлоза: структура, свойства и области применения (обзор) // Химия растительного сырья. 2013. № 3. С. 33–41.

17. Алешина Л.А., Гуртова В.А., Мелех Н.В. Структура и физико-химические свойства целлюлоз и нанокомпозитов на их основе. Монография. Петрозаводск. ПетрГУ, 2014. 240 с.

18. Алексеев В.А., Баженова С.И. Оптимизация бетонных составов для набрызгбетонирования при сооружении подземных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. №1. С. 8–17.

19. Boonen E., Akylas V., Barmpas F., Boréave A. et al. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels // Journal of Environmental Management. 2015. Pp. 136–144.

20. Hunger M., Hüsken G., Brouwers H.J.H. Photocatalysis applied to concrete products – Part 1: Principles and test procedure // ZKG International. 2008. Vol. 61. Pp. 77–85.

21. Magdalena J., Kamila Z. Concretes with Photocatalytic Activity // High Performance Concrete Technology and Applications. 2016. Pp. 141-161. DOI: 10.5772/64779.

#### Информация об авторах

**Шестаков Николай Игоревич**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения. E-mail: SHeStakovNI@mgsu.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Алексеева Дарья Сергеевна**, студент. E-mail: alekseevadariasier@gmail.com. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

**Полосина Диана Владимировна**, студент. E-mail: Polosina.di@yandex.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Поступила 13.08.2021 г.

© Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В., 2021

**\*Shestakov N.I., Alekseeva D.S., Polosina D.V.**

Moscow State University of Civil Engineering

\*E-mail: SHeStakovNI@mgsu.ru

## THE USE OF PHOTOCATALYTIC CONCRETES IN ROAD CONSTRUCTION

**Abstract.** The article discusses the possibility of reducing the atmospheric environmental load of highways by applying compositions with photocatalytic properties to acoustic screens. It is found that the amount

of nitrogen oxides on the territory of the city of Moscow exceeds the MPC norms. Therefore, a potential way to reduce the level of the average daily and maximum one-time MPC of nitrogen oxides is proposed, when using coatings of traditional acoustic screens with photocatalytic compositions. Titanium dioxide in anatase form is considered as a photocatalytic agent. To reduce the density and increase the porosity of cement compositions, a cellulosic suspension obtained by saturation in an aqueous medium with subsequent homogenization is introduced. The effect of cellulose in the considered cement systems in combination with a photocatalytic agent has been investigated. By the method of mathematical planning, a two-factor compositional experiment is compiled. In result, the degrees of influence of titanium dioxide and cellulose additives on the strength, density and water absorption of the composites under study are established. The study of the structure of the obtained composites shows that  $TiO_2$  is mainly located on the surface of cellulose fibers, which theoretically increases the useful surface for photocatalytic reactions and, as a consequence, the final efficiency of the compositions.

**Keywords:** acoustic screens, highways, environment, photocatalytic materials, cement composites, titanium dioxide, cellulose fibers.

## REFERENCES

1. Kargapolov N.V. Technology for assessing atmospheric air pollution by road transport [Texnologiya ocenki zagryazneniya atmosfernogo vozduxa avtomobilnym transportom]. Eurasian Scientific Association. 2019. No. 10-4 (56). Pp. 351–356. (rus)
2. Lyapidevskaya O.B., Frait M.A. Photocatalytic paving concrete [Fotokataliticheskij beton dlya dorodnogo stroitelstva]. Bulletin of the MGSU. 2014. Pp. 125-130. (rus)
3. Li H., Zhang M. H., Ou J.P. Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement. Wear. 2006. Vol. 260. No. 11–12. Pp. 1262–1266.
4. Sija A., Tongrong D., Hao D., Ying Ch., Wanting Ch. Preparation of nano- $TiO_2$ - $SiO_2$  microsphere coated composite material and evaluation of its self-cleaning property. Nanomaterials. 2017. Vol. 7, No. 11. 367 p.
5. Slesarev M.Yu., Popov K.V. Study of the efficiency of photo-catalytic concrete application in urban construction [Issledovanie effektivnosti primeneniya fotokataliticheskix betonov v gorodskom stroitelstve]. Modern building and architecture. 2017. No. 3 (07). Pp. 18–20. (rus)
6. Khanova E.A., Korobochkin V.V. Investigation of the parameters of the porous structure of titanium dioxide obtained by electrochemical synthesis on alternating current [Issledovanie parametrov poristoj struktury' dioksida titana, poluchennogo e'lektroximicheskim sintezom na peremennom toke]. Izvestiya TPU. 2003. No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-parametrov-poristoy-struktury-dioksida-titana-poluchennogo-elektroximicheskim-sintezom-na-peremennom-toke>. (rus)
7. Vasilyeva K.L., Ishchenko O.M., Zakharova N.V., Malkov A.A., Malygin A.A. Study of phase transformations in the surface layer of titanium dioxide [Izuchenie fazovykh prevrashhenij v poverkhnostnom sloe dioksida titana]. Journal. prikl. chemistry. 2009. Vol. 82. Issue 5. Pp. 731–736. (rus)
8. Blumel Zh. A method for processing titanium dioxide and a pigment based on it. Patent RF, no. 2367673C2, 2020.
9. Hela R., Bodnarova L. Research of Possibilities of Testing Effectiveness of Photoactive  $TiO_2$  in Concrete [Issledovanie vozmozhnosti testirovaniya e'ffektivnosti fotokataliza  $TiO_2$  v betone]. Building materials. 2015. No. 2. Pp. 77–81. (rus)
10. Kuzmicheva G.M. Nanosized phases with titanium (IV) oxides. Preparation. Characterisation. Properties [Nanorazmernye sistemy s oksidami titana(IV). Poluchenie. Karakterizaciya. Svoystva.]. Fine Chemical Technologies. 2015. Vol. 10. No. 6. Pp. 5–36. (rus)
11. Pozhivina K.A. New photocatalytic nano-additives based on titanium dioxide and silicon dioxide for self-cleaning concrete. [Novyye fotokataliticheskiye nanodobavki na osnove dioksida titana i dioksida kremniya dlya samoochishchayushchikhsya betonov]. Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 11. No. 3-4. Pp. 145–151. (rus)
12. Vakhrushev A.Yu., Krainov D.S., Boitsova T.B., Gorbunova V.V., Pak V.N. Photocatalytic properties of materials based on titanium(IV) oxide and silver nanoparticles. [Fotokataliticheskiye svoystva materialov na osnove oksida titana(IV) i nanochastits serebra]. Journal of Applied Chemistry. 2020. Vol. 93. No. 2. Pp. 282–289. (rus)
13. Belikov M.L., Sedneva T.A., Lokshin E.P. Adsorption and photocatalytic properties of titanium dioxide modified with tungsten [Adsorbtsionnyye i fotokataliticheskiye svoystva dioksida titana, modifitsirovannogo volframom]. Inorganic materials. 2021. Vol. 57. No. 2. Pp. 154–162. (rus)
14. Sadovnikov A.A., Nechaev E.G., Beltyukov A.N., Gavrilov A.I., Makarevich A.M., Boitsova O.V. Mesocrystals of titanium dioxide. Working surface in photocatalytic reactions [Mezokristally dioksida titana. Rabochaya poverkhnost v

fotokataliticheskikh reaktsiyakh]. Journal of Inorganic Chemistry. 2021. Vol. 66. No. 4. Pp. 432–439. (rus)

15. Yu X., Kang S., Long X. Compressive strength of concrete reinforced by TiO<sub>2</sub> nanoparticles. AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2036, No. 030006. Pp. 1–5.

16. Outlov S.A., Bazarnova N.G., Kushnir E.Yu. Microcrystalline cellulose: structure, properties and applications (review) [Mikrokristallicheskaya tsellyuloza: struktura, svoystva i oblasti primeneniya (obzor)]. Chemistry of vegetable raw materials. 2013. No. 3. Pp. 33–41. (rus)

17. Aleshina L.A., Gurtova V.A., Melekh N.V. Structure and physico-chemical properties of celluloses and nanocomposites based on them [Struktura i fiziko-khimicheskiye svoystva tsellyuloz i nanokompozitov na ikh osnove]. Monograph. Petrozavodsk: PetrSU, 2014. 240 p. (rus)

18. Alekseev V.A., Bazhenova S.I. [Optimizatsiya betonnykh sostavov dlya nabryzgbetonirovaniya pri sooruzhenii podzemnykh konstruksiy] Vestnik BSTU named after V. G. Shukhov. 2020. No. 1. Pp. 8–17. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-1-8-17(rus)

19. Boonen E., Akylas V., Barmpas F., Boréave A. et al. Photocatalytic de-pollution in the Leopold II tunnel in Brussels. Journal of Environmental Management. 2015. Pp. 136–144.

20. Hunger M., Hüsken G., Brouwers H.J.H. Photocatalysis applied to concrete products – Part 1: Principles and test procedure. ZKG International. 2008. Vol. 61. Pp. 77–85.

21. Magdalena J., Kamila Z. Concretes with Photocatalytic Activity. High Performance Concrete Technology and Applications. 2016. Pp. 141–161. DOI: 10.5772/64779.

#### *Information about the authors*

**Shestakov, Nikolay I.** PhD, Assistant professor. E-mail: SShestakovNI@mgsu.ru. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Alekseeva, Darya S.** Bachelor student. E-mail: Alekseevadariaser@gmail.com. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

**Polosina, Diana V.** Bachelor student. E-mail: Polosina.di@yandex.ru. Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

---

*Received 13.08.2021*

#### **Для цитирования:**

Шестаков Н.И., Алексеева Д.С., Полосина Д.В. Применение фотокаталитических бетонов в дорожном строительстве // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 12. С. 16–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-16-26

#### **For citation:**

Shestakov N.I., Alekseeva D.S., Polosina D.V. The use of photocatalytic concretes in road construction. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 12. Pp. 16–26. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-12-16-26