

А. А. Манцыбора, М. В. Полоник

К ПРОБЛЕМЕ УЧЕТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

*Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,
г. Владивосток*

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Аннотация. На основе полученных экспериментальных данных и численного анализа изучаются прочностные свойства композитных материалов в процессе их истирания. Особое внимание уделено стадиям, предшествующим разрушению материала. Численное моделирование проведено в программном комплексе ANSYS.

Ключевые слова: трибология, механика контактного взаимодействия, композитные материалы, истирание, бетон, разрушение, численное моделирование.

УДК: 539.421:691.327

Введение. В транспортных, гидротехнических сооружениях, поверхности которых подвергаются абразивному изнашиванию, широкое применение в качестве как конструкционных, так и защитных материалов, получили зернистые композиты на полимерных либо цементных вяжущих.

В процессе эксплуатации таких материалов их более мягкая структура разрушается, а более твердая – обнажается. Это приводит к потере эффективной толщины и изменению конструктивной схемы элементов. Эти особенности процессов истирания и разрушения необходимо учитывать при прогнозировании ресурсов зернистых композитов.

В данной статье особое внимание будет уделено строительным композитам, а именно бетону, на цементном вяжущем. По сравнению с конструкциями из металла, керамики и других материалов, для оценки прочности и долговечности конструкций из бетонов применение теоретических и экспериментальных методов механики контакта

© Манцыбора А. А., Полоник М. В., 2017

Манцыбора Александр Анатольевич

e-mail: manzubor@iacp.dvo.ru, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток.

Полоник Марина Васильевна

e-mail: apolonik@mail.ru, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук; доцент, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток.

Поступила 11.10.2017

затруднено из-за особенностей структуры бетонов. Поэтому в течение длительного времени изучение стойкости к истиранию бетонов осуществляется экспериментально. Составы бетонных смесей также выбираются по результатам экспериментов [1-3].

При математическом моделировании процесса истирания бетонной поверхности возникают проблемы, в первую очередь связанные с существенной неоднородностью данного материала. Модели изнашивания бетона с учетом его неоднородной структуры отражены в работах [1, 3-4]. В этих работах износ поверхности представлен как результат выпадения зерен заполнителя из цементно-песчаной матрицы. Выпадение зерен происходит при их оголении на определенную величину, сопоставимую с размером крупного заполнителя. В то же время на протяжении достаточно длительного эксплуатационного периода конструкций истирание поверхности происходит только за счет износа тонких приповерхностных слоев. В связи с этим достаточно сложно выбрать критерии применения математических моделей изнашивания бетонной поверхности на различных структурных уровнях.

В настоящей работе на основе полученных экспериментальных данных и численных расчетов изучаются прочностные свойства композитных материалов в процессе их истирания. Особое внимание уделено стадиям предшествующим разрушению материала. Численные расчеты осуществлялись на основе построенной имитационной модели в программном комплексе ANSYS.

Обоснование выбора структурных уровней на основе полученных экспериментальных данных Процесс изнашивания, согласно [1-3, 5], может быть разделен на следующие возможные стадии:

стадия I – начальная, в которой происходит процесс изнашивания цементного камня, сольватных оболочек и обнажение зерен крупного и мелкого заполнителей;

стадия II – нормальная эксплуатационная, в которой происходит процесс истирания зерен крупного заполнителя и цементно-песчаной матрицы, причем с разной скоростью, зависящей от их физических свойств; после обнажения поверхности зерен крупного заполнителя поверхность представлена совокупностью областей с различными трибологическими характеристиками;

стадия III – разрушения поверхности бетона. Здесь возможны два случая: случай 1 – происходит усталостное разрушение матрицы (объемное микрорастрескивание) между зернами крупного заполнителя, приводящее к их выпадению, что характерно для бетона с малопрочной цементно-песчаной матрицей; случай 2 – прорастание усталостной макротрещины на границе между зернами крупного заполнителя и цементно-песчаной матрицей, что характерно для высокопрочных бетонов.

В работе [2] выбор структурных уровней обоснован экспериментально. С целью уточнения границ применения математических моделей был проведен ряд опытов с использованием истирающего круга ЛКИ-3 по стандартной методике (ГОСТ 13087) [6]. В результате было установлено, что в определенный, достаточно продолжительный период времени горизонтальные деформации материала незначительны и стабильны (стадии I и II). Далее происходило скачкообразное увеличение величины и амплитуды деформаций (переход в стадию III). Наибольшие горизонтальные деформации наблюдались на высоте 0.7-1.5 максимального размера крупного заполнителя, а не в непосредственной близости от истираемой грани. Это объясняется работой сил трения. С помощью датчиков была зафиксирована максимальная концентрация деформаций на жестких включениях, что объясняется концентрацией напряжений вокруг жестких включений. В [2] также были проведены испытания для развития

усталостной трещины. Результаты эксперимента показали, что причиной прорастания трещины на контакте является достижение относительными деформациями предельных для бетона значений. Трещина прорастает постепенно с определенной скоростью. Скорость прорастания зависит от пути.

Экспериментальные исследования показали, что процесс износа поверхности бетона на начальных этапах (стадия I, II) происходит в достаточно тонких (< 1 мм) слоях и не приводит к изменению структуры материала в приповерхностной зоне. Скорость истирания зависит от трибологических характеристик поверхности бетона. В дальнейшем это позволило более гибко использовать математический аппарат механики контактного взаимодействия.

Математическое моделирование начальной и эксплуатационной стадий

Математическое моделирование процесса истирания в начальной (I) стадии, исходя из полученных экспериментальных данных, сводится к моделированию истирания однородного тела [5, 7-9]. Степень изнашивания задается $-\partial w^*/\partial t$ и зависит от скорости ν , давления p на контакте поверхности, твердости материала H , а также от параметров, имеющих определенное значение для каждого механизма процесса изнашивания и используемых для его моделирования.

Математическое моделирование в стадия II сводится к моделированию неравномерного изнашивания материала с неоднородной структурой. Более мягкая структура мелкого заполнителя цементной матрицы разрушается, в результате чего достаточно ровная поверхность становится волнообразной – зерна крупного заполнителя обнажаются на поверхности. Применение математической модели, используемой для I стадии, здесь невозможно. Процесс изнашивания необходимо рассматривать одновременно на микроуровне – истирание поверхности заполнителя; и мезоуровне – разрушение цементной матрицы. Последнее приводит к изменению формы поверхности [1-2, 4]. Поэтому здесь приемлемо использование математических инструментов механики фрикционного взаимодействия [10-11]. При этом давление p и скорость ν – постоянные, а процесс установившийся. Поверхность бетона представлена как упругое полупространство с областью, усиленной в круговых областях. Расстояние между центрами усиленных зон вдоль на одной оси равны l . Применение данной математической модели для включений различных геометрических форм (окружность, квадрат, шестиугольник), подробно описано в [5, 7-9, 12-13]. Представленные в интегральной форме решения учитывают как геометрические параметры упрочненных областей и их количество, так и трибологические характеристики материала (параметры, характеризующие степень упрочнения, и относительный размер упрочненной зоны). Полученные численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [2, 5, 14, 15] и позволяют сформулировать рекомендации для подбора состава и технологических параметров строительных композитов с высокой прочностью и износостойкостью.

Численное моделирование стадии истирания предшествующей разрушению Следует заметить, что, прежде чем рассмотреть III стадию (стадию разрушения), построим имитационную модель и сравним ее с экспериментальными данными. Все построения и расчеты будем производить с использованием одного из известных специальных программных пакетов для инженерных расчетов механики (ANSYS). На рис. 1 представлен бетонный кубик, который неоднократно подвергался истиранию по верхней поверхности, как это было описано ранее в экспериментальной части статьи.



Рис. 1. Экспериментальный образец

Построенная в Ansys область выбранного объекта (рис. 1) включает в себя не только упрочненные области (А) и матрицу мелкого заполнителя (В), но и микропоры (С) (рис. 2). При имитационном моделировании рассмотрим возможные варианты, предшествующие стадии разрушения III при приложенной нагрузке, как указано на рис. 2. Расчеты проводились для заданных параметров материала (таб. 1), и приложенных нагружающих усилий $P_x = 6.9$ МПа, $P_y = 1.1$ МПа.

Материал	Модуль Юнга, Е, ГПа	Коэффициент Пуассона, ν
Цементно-песчаная матрица (В)	20	0,16
Песчаник кварцевый (жесткие включения) (А)	46	0,21

Таблица 1. Параметры материала

Максимальные сжимающие и растягивающие усилия σ_x достигаются на поверхностях материала в окрестности жестких включений, что подтверждено экспериментально рис. 3.

На рис. 4 представлены максимальные напряжения σ_y : в окрестностях между жесткими включениями; в окрестностях микропор; в окрестностях микропор и жестких включений. Таким образом, чем больше микропор в матрице мелкого заполнителя (рис. 4), тем материал менее прочный. Дальнейшая эксплуатация такого материала

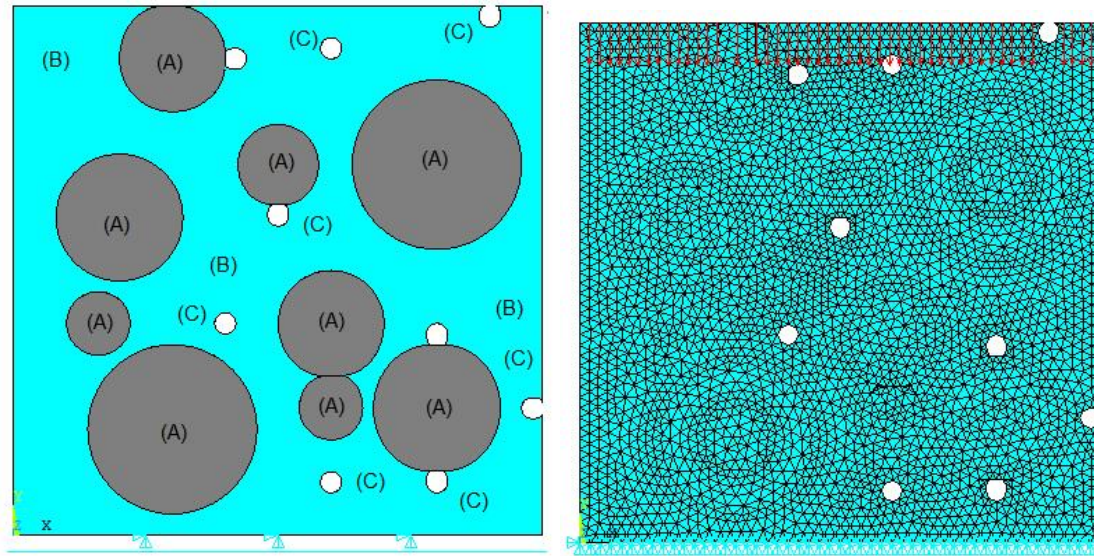
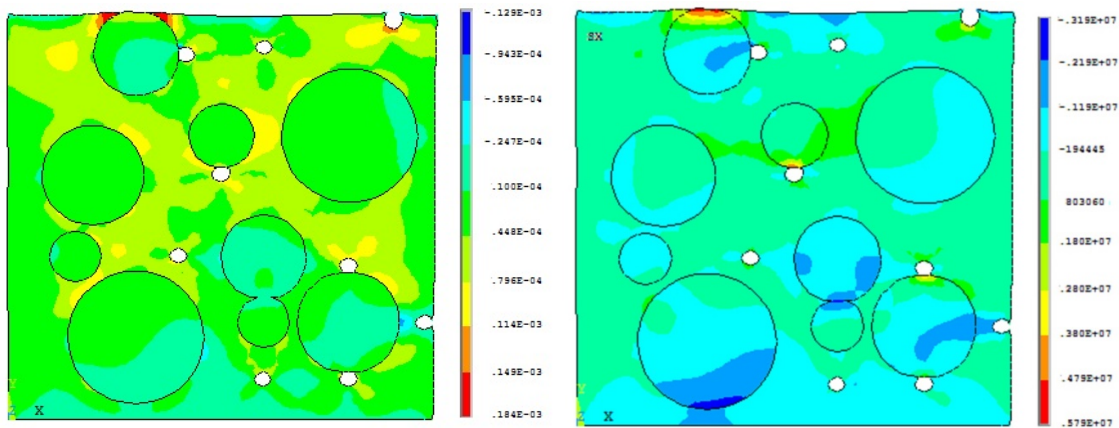


Рис. 2. Графическая реализация экспериментального образца

Рис. 3. Распределение в истираемой среде deformаций d_x и напряжений σ_x соответственно

приведет к 1 случаю усталостного разрушения – к микро-растрескиванию. Как показывает эксперимент, это как раз и характерно для бетонов с малопрочной цементно-песчаной матрицей.

Для жестких включений, близких к поверхности истирания (рис. 4), произойдет прорастание усталостной макротрещины на границе между зернами крупного заполнителя и цементно-песчаной матрицей (случай 2) и выпадение зерна. Как показывает эксперимент, это характерно для высокопрочных бетонов.

С помощью имитационной модели (рис. 3 – рис. 5), как и при эксперименте, была зафиксирована максимальная концентрация deformаций на жестких включениях, и максимальная концентрация напряжений в окрестности жестких включений.

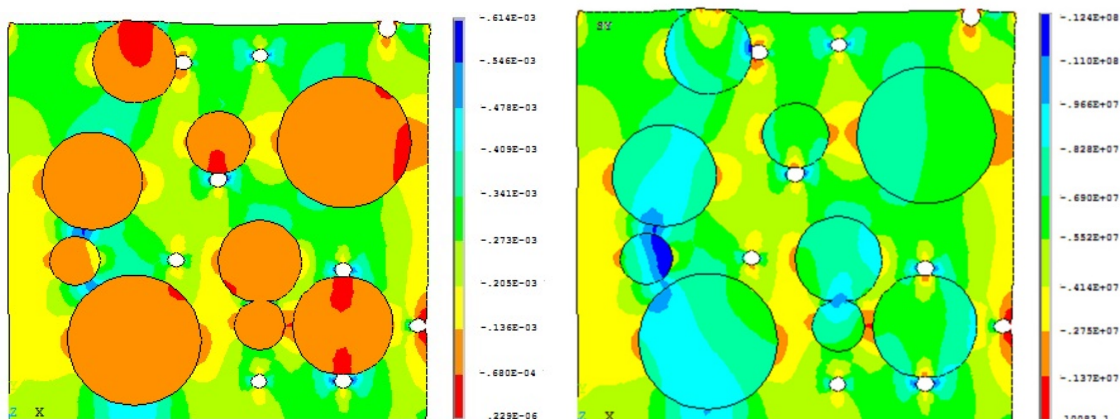


Рис. 4. Распределение в истираемой среде деформаций d_y и напряжений σ_y соответственно

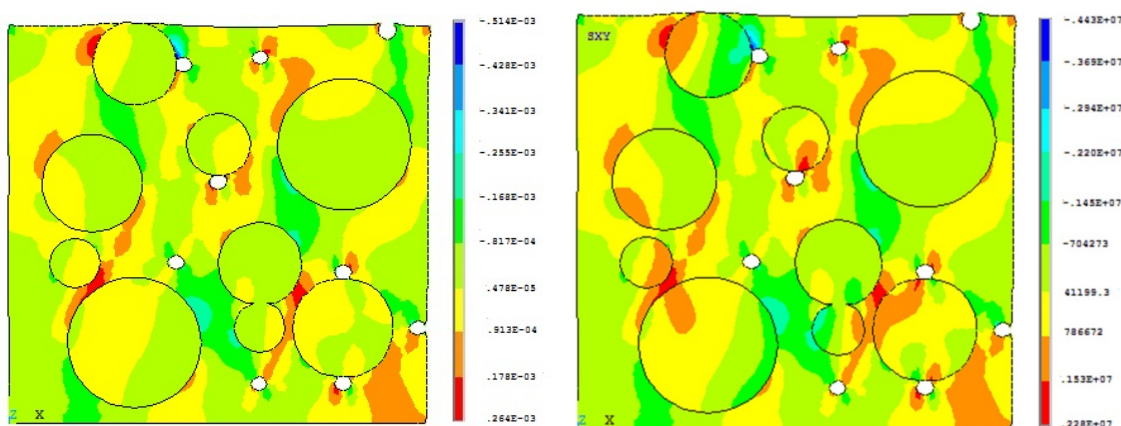


Рис. 5. Распределение в истираемой среде деформаций d_{xy} и напряжений σ_{xy} соответственно

Выводы. Таким образом, и экспериментальные, и численные расчеты показывают возможность разрушения неоднородного материала по двум возможным направлениям: микро-растрескивание или выпадение зерен крупного заполнителя у поверхности. Однако, какое из направлений реализуется, предсказать заранее невозможно. Это зависит не только от трибологических характеристик исследуемого материала, но и от наличия в нем неизвестного количества микропор и жестких включений. Поэтому моделирование таких случайных процессов необходимо осуществлять либо с помощью специальных вероятностных методов (например, методом Монте-Карло), либо с использованием имитационного моделирования в программных пакетах типа ANSYS. Построенная в ANSYS имитационная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными. Эта модель позволяет оценить максимальные и минимальные уровни напряжений и деформаций в представленном образце и прогнозировать зарождение трещин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Itoh Y., Yoshida A., Tsuchiya M., Katoh K. An experimental study on abrasion of concrete due to sea ice. Proc. of Offshore Technology Conference, 1988. P. 297–305.
- [2] Макарова Н. В. Об учете неоднородности при моделировании процесса истирания бетона // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3. С. 137–139.
- [3] Makarova N. V. Experimental and theoretical investigation on abrasion strength of concrete. Assessment of Reliability of Materials and Structures: Problems and Solutions: Proceedings of the Intern. Conference. SPb.: Polytechnic Univ. Publ., 2008. P. 219–224.
- [4] Saeki H., Asai Y., Izumi K., Takeuchi T. Study of the abrasion of concrete due to sea ice. The 20th Marine Development Symposium. Japan, 1988.
- [5] Макарова Н. В., Полоник М. В. К проблеме учета неоднородности при моделировании процесса истирания бетона // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2010. 2(8) С. 326–332.
- [6] Гост 13087–81. Бетоны. Методы определения истираемости. GOST 13087–81.
- [7] Makarova N. V., Polonik M. V. Modeling of the wear on the concrete at the micro- and mesolevels on the basis of experimental findings // FEFU: School of Engineering Bulletin. 2012. N 1 (10). P. 116–120
- [8] Makarova N. V., Polonik M. V. Abrasion Wear of Heterogeneous Materials // Applied Mechanics and Materials. 2013. №248. P. 355–360. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.248.355.
- [9] Makarova N. V., Polonik M. V. Modelling the influence of structural and compositional parameters on the abrasion resistance of concrete. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012. P. 67–71.
- [10] Горячева И. Г. Контактные задачи теории упругости для системы изнашивания штампов // Известия РАН СССР. МТТ. 1987. № 6. С. 62–68.
- [11] Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
- [12] Makarova N. V., Polonik M. V., Rogachev E.E. Abrasion deterioration of inhomogeneous materials // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия Механика предельного состояния. 2012. № 4(14). С. 164–173.
- [13] Макарова Н. В., Полоник М. В. Формирование рельефа истираемой поверхности неоднородных материалов // Механика деформируемого твердого тела. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1591–1593.
- [14] Makarova N. V. Relations between Concrete Structural Parameters and Abrasion Resistance // Applied Mechanics and Materials. 2013. P. 1259–1262. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1259.
- [15] Макарова Н. В., Полоник М. В. Моделирование процесса разрушения бетонной поверхности при абразивном износе // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук профессора Соломатова Василия Ильича / редкол.: В.П.Селяев [и др.]; отв. ред. Т.А.Низина. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. С. 76–80. ISBN 978-5-7103-3299-3.

A. A. Mantsybora, M. V. Polonik

THE PROBLEM OF ACCOUNTING OF EXPERIMENTAL DATA AND NUMERICAL MODELING THE GRANULAR COMPOSITE ABRASION

Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok

Far Eastern Federal University, Vladivostok

Abstract. Based on the obtained experimental data and numerical calculations, the strength properties of composite materials in the process of abrasion are examined. Particular attention is paid to the stages preceding the destruction of the material. Numerical calculations were carried out in the software package ANSYS.

Keywords: tribology, the mechanics of contact interaction, composite materials, abrasion, concrete, structure deterioration, numerical modeling.

REFERENCES

- [1] Itoh Y., Yoshida A., Tsuchiya M., Katoh K. An experimental study on abrasion of concrete due to sea ice. Proc. of Offshore Technology Conference, 1988. P. 297–305.
- [2] Makarova N. V. Ob uchete neodnorodnosti pri modelirovanii processa istiraniya betona // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2009. № 3. С. 137–139. (in Russian)
- [3] Makarova N. V. Experimental and theoretical investigation on abrasion strength of concrete. Assessment of Reliability of Materials and Structures: Problems and Solutions: Proceedings of the Intern. Conference. SPb.: Polytechnic Univ. Publ., 2008. P. 219–224.
- [4] Saeki H., Asai Y., Izumi K., Takeuchi T. Study of the abrasion of concrete due to sea ice. The 20th Marine Development Symposium. Japan, 1988.
- [5] Makarova N. V., Polonik M. V. K probleme ucheta neodnorodnosti pri modelirovanii processa istiraniya betona // Vestnik CHGPU im. I.YA. YAKovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2010. 2(8) S. 326–332. (in Russian)
- [6] Gost 13087–81. Betony. Metody opredeleniya istiraemosti. GOST 13087–81. (in Russian)
- [7] Makarova N. V., Polonik M. V. Modeling of the wear on the concrete at the micro- and mesolevels on the basis of experimental findings // FEFU: School of Engineering Bulletin. 2012. N 1 (10). P. 116–120
- [8] Makarova N. V., Polonik M. V. Abrasion Wear of Heterogeneous Materials // Applied Mechanics and Materials. 2013. №248. P. 355–360. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.248.355.

Mantsybora Alexandr Anatolevich

e-mail: manzubor@iacp.dvo.ru, Ph.D. (Phys. & Math.), Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok.

Polonik Marina Vasilevna

e-mail: apolonik@mail.ru, Ph.D. (Phys. & Math.), Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS; Assistant Professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok.

- [9] Makarova N. V., Polonik M. V. Modelling the influence of structural and compositional parameters on the abrasion resistance of concrete. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2012. P. 67–71.
- [10] Goryacheva I. G. Kontaktnye zadachi teorii uprugosti dlya sistemy iznashivaniya shtampov // Izvestiya RAN SSSR. MTT. 1987. № 6. S. 62–68. (in Russian)
- [11] Goryacheva I. G. Mekhanika frikcionnogo vzaimodejstviya. M.: Nauka, 2001. 478 s. (in Russian)
- [12] Makarova N. V., Polonik M. V., Rogachev E.E. Abrasion deterioration of inhomogeneous materials // Vestnik CHGPU im. I.YA. YAKovleva. Seriya Mekhanika predel'nogo sostoyaniya. 2012. № 4(14). C. 164–173. (in Russian)
- [13] Makarova N. V., Polonik M. V. Formirovanie rel'efa istiraemoj povernosti neodnorodnyh materialov // Mekhanika deformiruемого tverdogo tela. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. 2011. № 4 (4). C. 1591–1593. (in Russian)
- [14] Makarova N. V. Relations between Concrete Structural Parameters and Abrasion Resistance // Applied Mechanics and Materials. 2013. P. 1259–1262. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1259.
- [15] Makarova N. V., Polonik M. V. Modelirovanie processa razrusheniya betonnoj povernosti pri abrazivnom iznose // Dolgovechnost' stroitel'nyh materialov, izdelij i konstrukcij: materialy Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, posvyashchennoj pamyati zaslužennogo deyatelya nauki Rossijskoj Federacii, akademika RAASN, doktora tekhnicheskikh nauk professora Solomatova Vasiliya Il'icha / redkol.: V.P.Selyaev [i dr.]; otv. red. T.A.Nizina. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2016. S. 76–80. ISBN 978-5-7103-3299-3. (in Russian)