

УДК 691.162

## ОЦЕНКА РЕСУРСА ИЗДЕЛИЙ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ВЯЖУЩЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И ВИРТУАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Е.С. Боровкова<sup>1</sup>, Д.Н. Шабанов<sup>2</sup>, Д.О. Окунев<sup>3</sup>*

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

e-mail: <sup>1</sup> [e.borovkova@psu.by](mailto:e.borovkova@psu.by), <sup>2</sup> [d.shabanov@psu.by](mailto:d.shabanov@psu.by), <sup>3</sup> [d.okunev@psu.by](mailto:d.okunev@psu.by)

*Приведены результаты мониторинга структурных изменений в искусственных конгломератах на органическом вяжущем методом акустической эмиссии (АЭ). Представлены экспериментальные исследования в образцах асфальтобетона при внешних и внутренних нагрузках. Определена связь между прочностными и АЭ характеристиками каждого образца при одноосном нагружении, а также проведено компьютерное моделирование оценки упругих свойств образцов по схеме «бразильского теста».*

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, асфальтобетон, «бразильский метод», компьютерное моделирование.

## RESOURCE ASSESSMENT OF PRODUCTS BASED ON ORGANIC BINDER USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD AND VIRTUAL SIMULATION

*E. Borovkova<sup>1</sup>, D. Shabanov<sup>2</sup>, D. Okunev<sup>3</sup>*

Polotsk State University, Republic of Belarus

e-mail: <sup>1</sup> [e.borovkova@psu.by](mailto:e.borovkova@psu.by), <sup>2</sup> [d.shabanov@psu.by](mailto:d.shabanov@psu.by), <sup>3</sup> [d.okunev@psu.by](mailto:d.okunev@psu.by)

*The results of monitoring of structural changes in artificial conglomerates based on organic binder by acoustic emission (AE) are presented. Experimental studies in asphalt concrete samples under external and internal loads are presented. The relationship between the strength and AE characteristics of each sample under uniaxial loading is determined, and the elastic properties of the samples are modeled according to the "Brazilian test" scheme.*

**Keywords:** acoustic emission, asphalt concrete, "Brazilian method", computer modeling.

**Введение.** Конгломераты активно формируют свои свойства в процессе эксплуатации, в результате чего возникающие изменения оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на их структуру на разных масштабных уровнях. Информация о поведении материалов на этих уровнях является крайне важной для оценки эксплуатационных характеристик строительных конструкций, а также для создания новых материалов и технологий.

Структуру асфальтобетонной смеси и асфальтобетона обычно разделяют на три подсистемы [1]:

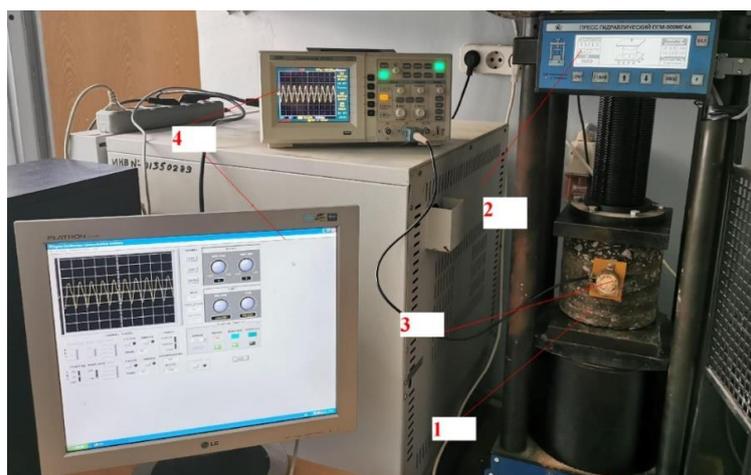
1. Микроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из битума и наполнителя (минерального порошка).
2. Мезоструктура – двухкомпонентная система, состоящая из асфальтового вяжущего вещества и песка.
3. Макроструктура – двухкомпонентная система, состоящая из асфальтового раствора и заполнителя.

Каждая подструктура представляется состоящей из двух условно сплошных взаимопроникающих сред: твердого каркаса (скелета) и жидкой (или отвердевшей) сплошной фазы. В процессе формирования структуры асфальтобетона каждая жидкая фаза насыщается в определенной степени диспергированными в ней частицами твердой фазы и образует тот или иной тип конгломератной структуры [1].

Важнейшей задачей для правильного конструирования дорожных асфальтобетонных покрытий и выбора путей повышения их долговечности является установление закономерностей поведения асфальтобетонных покрытий в условиях воздействия непрерывно изменяющихся эксплуатационных факторов [2]. Сложность этой задачи в значительной степени определяется особенностями реологического поведения асфальтобетона как многокомпонентного термопластичного материала. С помощью метода АЭ можно регистрировать внутреннюю структурную активность асфальтобетона. Данный метод предпочтителен тем, что он показывает чувствительность захвата многочисленных сигналов упругих волн еще во время схватывания материала.

В настоящее время метод акустической эмиссии является одним из наиболее распространенных и широко развиваемых методов неразрушающего контроля. Он применяется в различных отраслях промышленности для проведения неразрушающего контроля и исследования технологических процессов [3]. АЭ метод основан на явлении генерации упругих волн при структурных изменениях материала. Достаточно быстрое протекание физических процессов изменения структуры в ограниченном объеме материала (пластическая деформация, разрушение, образование и рост трещин, движение дислокаций, фазовые превращения, трение и т.д.) сопровождается излучением акустических волн [4]. Данный метод предпочтителен тем, что он показывает чувствительность захвата многочисленных сигналов упругих волн еще во время схватывания материала. С помощью метода АЭ можно регистрировать внутреннюю структурную активность асфальтобетона в процессе его формирования.

**Исследовательская часть.** Нами были исследованы сигналы АЭ в образцах из асфальтобетона, подверженные как внутренним напряжениям (влияние растворов солей NaCl), так и внешним (режим одноосного деформирования). В работе были исследованы как образцы, изготовленные в лабораторных условиях, так и керны, вырезанные из дорожного полотна.



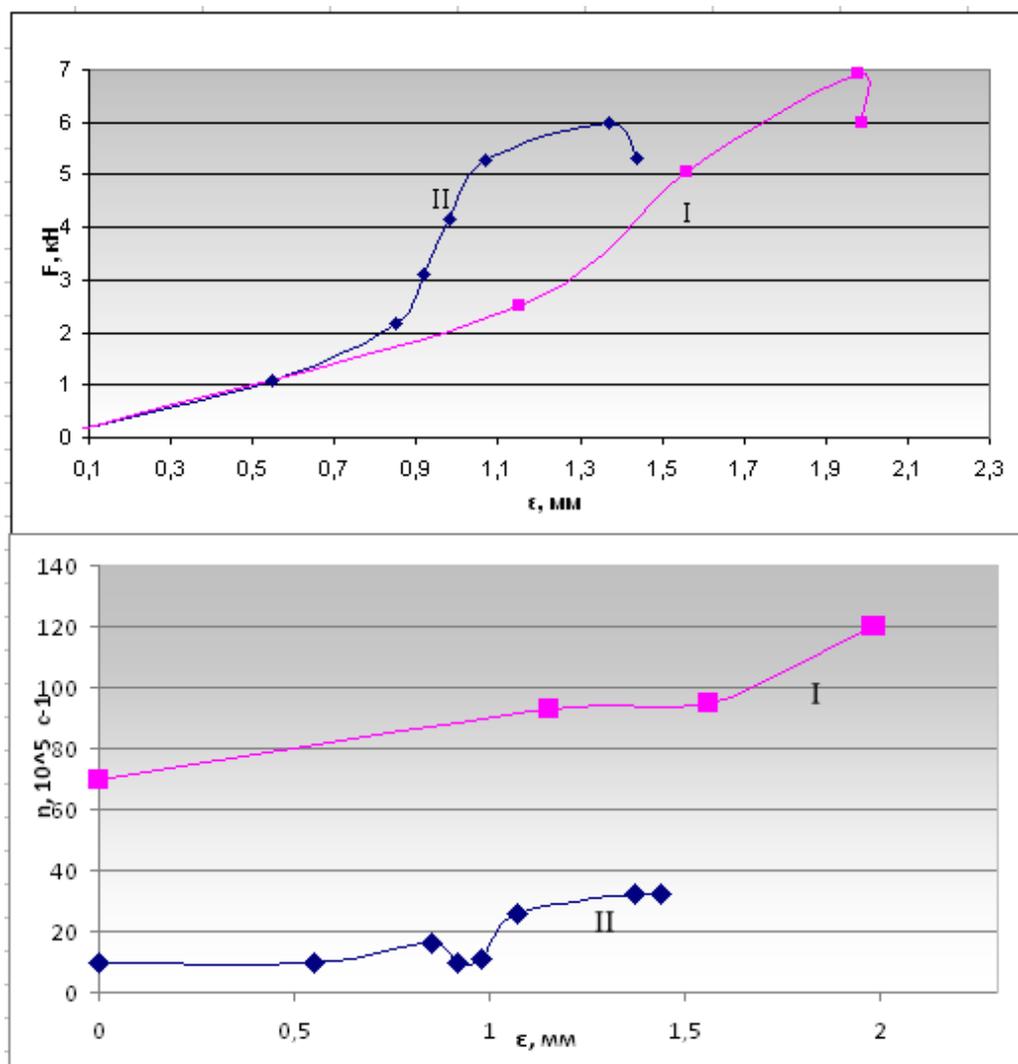
1 – образец из асфальтобетона, 2 – пресс гидравлический, 3 – пьезодатчик, 4 – АЭ комплекс

Рисунок 1. – Внешний вид экспериментального оборудования

В качестве нежестких дорожных покрытий были исследованы лабораторные образцы асфальтобетона цилиндрической формы диаметром 7 мм и высотой 10 мм. Одни образцы находи-

лись в естественных нормально-влажностных условиях (с исключением агрессивного влияния солевого воздействия на бетон), и другие - погруженные на 6 месяцев в солевом растворе (5% -ом растворе NaCl). Целью эксперимента являлось выявление закономерностей изменения свойств асфальтобетона в агрессивной среде. При лабораторных испытаниях запускались две программы: одна для регистрации параметров сигналов АЭ и вторая - для регистрации механических величин. Для испытаний были использованы установка, представленная на рисунке 1.

Параметры активности АЭ, т.е. числа импульсов в единицу времени, в образце, находившемся в нормальных условиях намного выше, чем в образце, находившемся в хлоридной среде, т.е. в данном случае ионы  $Cl^-$  уменьшили интенсивность сигналов АЭ. Хлоридная среда в асфальтобетоне вызывает меньшую активность акустических сигналов. Также прочностные характеристики показали, что агрессивная среда снижает эксплуатационные характеристики дорожного покрытия. При увеличении локального напряжения до величины, превосходящей предел прочности материала, наблюдается резкое увеличение активности сигналов АЭ (рисунок 2).



а) – зависимость разрушающей силы  $F$  от относительной деформации  $\epsilon$ ;  
 б) – зависимость активности АЭ от деформации  $\epsilon$

Рисунок 2. – Взаимосвязь между прочностными и АЭ характеристиками лабораторных образцов асфальтобетона в естественных условиях (I) и пробывшего в 5% -ом растворе NaCl (II)

Поэтому, когда напряжение в образцах приближается к исчерпывающему ресурсу материала, то начинается резкий рост числа импульсов. Учитывая вышесказанное, можно заключить, что экспериментальный комплекс, представленный выше, дает возможность определять эксплуатационные характеристики асфальтобетонных конструкций под действием внутренних (коррозия) и внешних (механическая нагрузка) напряжениях.

Также были исследованы образцы эксплуатируемого дорожного полотна (возрастом менее 3 лет) цилиндрической формы диаметром 150 мм и высотой 145 мм. Эксперимент проводился аналогичный испытаниям для лабораторных образцов из асфальтобетона. Зависимости напряженно-деформационных характеристик между лабораторными и уже эксплуатируемыми образцами значительно не отличается. Активность же АЭ между этими образцами различна. Так, в лабораторных образцах количество импульсов не меняется до момента потери эксплуатационных характеристик объекта, а в образцах эксплуатируемого дорожного покрытия можно выделить несколько областей. Активность АЭ вначале нагружения образца имеет более высокие показатели, чем при дальнейшем его нагружении. После чего только при критических значениях для образца происходит резкое увеличение числа импульсов.

Сравнивая лабораторные образцы из асфальтобетона, можно сделать вывод о том, что активность АЭ в образцах, поврежденных коррозией ниже в среднем в 7 раз, это связано с изменением внутренней структуры материала, и как следствие, затуханием звуковых волн. В образцах из асфальтобетона дорожного полотна активность АЭ на начальной стадии нагружения увеличилась в 3 раза, после чего имела устойчивый характер, и уже при переходе к критическому состоянию изменилась на 50 %.

**Апробация возможности моделирования оценки упругих свойств образца по схеме «бразильского теста».** Помимо испытаний на сжатие асфальтобетонных образцов, нами были проделаны эксперименты по определению прочности образцов на растяжение с помощью компьютерного моделирования. Бразильский метод заключается в том, что прочность материала на растяжение определяется из испытания цилиндрического образца на сжатие в диаметральной плоскости равномерно распределенной вдоль образующей нагрузкой, передаваемой ребром треугольной призмы [10]. Расчёт производился в пакете ANSYS Mechanical версии 16.2, который верифицирован для проведения подобных вычислений [12, 13]. Пакет использует численный метод конечных элементов (МКЭ).

Образец имел форму диска диаметром 150 мм и толщиной 20 мм. Материал образца считался изотропным и абсолютно упругим, модуль упругости был принят за 300 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3. Такое значение было выбрано, как одно из возможных для асфальтобетона разных плотностей и температур при статической нагрузке.

Образец в модели был помещён между двух параллельных штампов в форме плоско-параллельных пластин из конструкционной стали (стандартный материал пакета ANSYS, модуль Юнга равен 200 ГПа). Механическая нагрузка образца производилось кинематически – верхний штамп сдвигался на величину 2 мм по направлению к нижнему штампу, вдоль диаметра диска. Схема схожа с представленной в работе [14].

Решение линейной упругой задачи осуществлялось методом Ньютона-Рафсона с достижением равновесия на каждом шаге вычисления. Сеточное разбиение образца для вычислений МКЭ производилось программой автоматически, исходя из геометрии задачи. Достигалась сходимость 20% для механического напряжения при уменьшении элемента разбиения. Некоторые результаты моделирования представлены на рисунке 3.

Представленная модель демонстрирует возможность проведения подобных вычислений, однако она требует дальнейшей доработки с целью увеличения точности расчётов. Для

этого её параметры необходимо согласовать с результатами натуральных экспериментов, а также провести оптимизации для снижения времени вычислений. В случае разработки точной вычислительной модели, её использование позволит упростить оценку прочностных свойств строительных материалов.

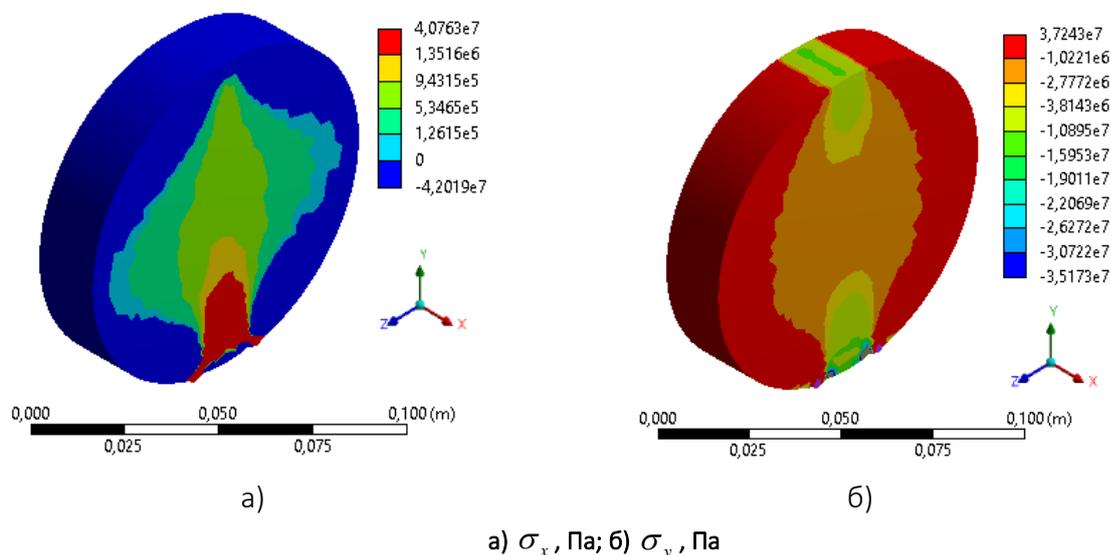


Рисунок 3. – Изоповерхности компоненты напряжения

**Выводы.** Использование программного пакета ANSYS Mechanical для определения прочности асфальтобетонных образцов на растяжение по схеме «бразильского теста» позволит упростить оценку прочностных свойств строительных материалов, что послужит дальнейшей работой в этой области. Также метод акустической эмиссии позволяет определить параметры эксплуатационных и предельных напряженно-деформированных состояний дорожных покрытий при силовых и коррозионных воздействиях. Опираясь на приведенные исследования, возникает возможность использовать метод акустической эмиссии в качестве сопровождения асфальтобетонных объектов, выражающаяся в получении информации о возникновении и развитии опасных состояний в режиме реального времени, а также определении ресурса на любой стадии эксплуатации. Как структурно чувствительный метод акустическая эмиссия обеспечивает обнаружение процессов пластической деформации, собственно разрушения и фазовых переходов. Указанные свойства акустико-эмиссионного метода дают возможность формировать адекватную систему классификации дефектов и критерии оценки технического состояния объекта, основанные на реальном влиянии дефекта на прочность и работоспособность объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А., Мелик-Багдасарова Н.А. Строительство и ремонт дорожных асфальтобетонных покрытий: учеб. пособие / Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А., Мелик-Багдасарова Н.А. – Белгород, 2007.
2. Руденский А.В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / Руденский А.В.- М.: Транспорт, 1992.- 254 с.
3. ГОСТ Р 52727—2007 Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования.
4. Бехер, С. А. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии : учеб. пособие / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. — Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2013. — 145 с.
5. Якимович, В.Д. Твердение портландцемента / В.Д. Якимович // Сб. трудов Проблемы современного бетона и железобетона, ч.2 Технология бетона, 2009. – С. 448 – 460.

6. Бардаков, В.В., Сагайдак, А.И. Прогнозирование прочности бетона в процессе его твердения при помощи метода акустической эмиссии / В.В. Бардаков, А.И. Сагайдак. // РАН: Дефектоскопия №6, 2017. – С.40 - 43.
7. Aggelis D.G., Polyzos D., Philippidis T.P. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results / Aggelis D.G., Polyzos D., Philippidis T.P. // Journal of the Mechanics and Physics of solids 2005. – P. 857–883.
8. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVERS. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave/. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVERS // Spectroscopy, 2006. – P. 1–9.
9. Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin. Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixture mortars / Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin // Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, v. 13, 2006. – P. 18–24.
10. Молотников В.Я., Молотникова А.А. Замечания к бразильскому методу исследования прочности хрупких материалов на растяжение / Молотников В.Я., Молотникова А.А. // Вестник ДГТУ. 2014. Т. 14, № 4 (79), С. 30-38.
11. Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Боровкова Е.С. Мониторинг уровней динамики структурообразования цементного камня методом акустической эмиссии и прогнозирование ресурса на его этапах твердения / Шабанов Д.Н., Ягубкин А.Н., Боровкова Е.С. // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электронный сборник статей II международной научной конференции, Полоц. гос. ун-т, 2020. - С. 272 – 279.
12. Release 16.2 Documentation for ANSYS [electronic document] / ANSYS Inc. Electronic data and software.
13. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.Y. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications / Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H.Y. – Springer. 2009. – 321 p.
14. Goltsev V.Yu., Osintsev A.V, Plotnikov A.S. Application of a disk specimen loaded according to the "Brazilian test" for evaluating the brittle strength of materials of non-geological origin / V.Yu. Goltsev, A.V. Osintsev, A.S. Plotnikov. Letters on materials 7 (1), 2017.- P. 21-25.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

*Текстовое электронное издание*

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2021

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Одобрено и рекомендовано в качестве электронного издания  
Советом инженерно-строительного факультета (протокол № 8 от 27.10.2021 г.)

**Редакционная коллегия:**

Д. Н. Лазовский (председатель), А. А. Бакатович, Е. Д. Лазовский,  
Л. М. Парфенова, Ю. В. Вишнякова, Р. М. Платонова, Е. Г. Кремнева, А. М. Хаткевич

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

[Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. III междунар. науч. конф., Новополоцк, 29–30 апр. 2021 г. / Полоц. гос. ун-т ; Редкол.: Д. Н. Лазовский (председ.) [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-779-2.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.  
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018 г.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**№ госрегистрации 3671815379**

**ISBN 978-985-531-779-2**

©Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:  
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
III МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 29–30 апреля 2021 г.)

Технический редактор *И. Н. Чапкевич*.

Компьютерная верстка *А. А. Прадидовой, С. Е. Рясовой*.

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой*.

---

Подписано к использованию 16.11.2021.

Объем издания: 13 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 736.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>