

УДК 691.162

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТВЕРДЕЮЩЕГО ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫМ МЕТОДОМ**

Е.С. Боровкова¹, Д.Н. Шабанов²

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь
e-mail: e.borovkova@psu.by¹, d.shabanov@psu.by²

Представлены физико-химические особенности твердеющего цементного камня на разных масштабных уровнях, а также экспериментальные исследования акустической эмиссии, возбуждаемых в цементных пастах на основных этапах структурообразования. Определена связь между уровнями структуры цементного камня и сигналами АЭ в эти периоды.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, цементный камень, этапы структурообразования.

**PHYSICAL FEATURES OF HARDENING CEMENT STONE AND DETERMINATION
OF ITS OPERATIONAL PROPERTIES BY ACOUSTIC-EMISSION METHOD**

E. Borovkova¹, D. Shabanov²

Polotsk State University, Republic of Belarus
e-mail: e.borovkova@psu.by¹, d.shabanov@psu.by²

Physical and chemical features of hardening cement stone at different scale levels are presented, as well as experimental studies of acoustic emissions excited in cement pastes at the main stages of structure formation. The relationship between the levels of the cement stone structure and the AE signals during these periods is determined.

Keywords: acoustic emission, cement stone, structural stages.

Введение. Структура бетона состоит из множества атомов и развивается во времени с момента взаимодействия компонентов цемента с водой и до момента потери эксплуатационных свойств строительной конструкции, в результате чего возникают изменения, оказывающие как положительное, так и отрицательное влияние на 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. Один из методов, который позволят исследовать свежий бетон и прогнозировать его ресурс еще на стадии твердения является метод акустической эмиссии (АЭ). АЭ метод неразрушающего контроля 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 бетона в процессе его твердения.

Физические свойства твердеющего бетона. Структура твердеющего цементного камня состоит из [2]:

- твердой фазы, включающей гель гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, обладающих свойствами коллоидов, относительно крупные кристаллы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и этрингита, а также непрореагировавшие зерна клинкера, содержание которых уменьшается по мере гидратации цемента;

- пор (поры геля размером менее 100 нм, капиллярные поры размером от 100 нм до 10 мкм, воздушные поры и пустоты размером от 50 мкм до 2 мм).

Между частицами твердой и жидкой фазы возникают силы [12]:

- механические силы, возникающие между частицами размером 1-4 мм;
- капиллярные силы, возникающие между частицами размером 0,1 – 1 мм. Это силы поверхностного натяжения в водных менисках на контакте твердых тел при отсутствии избыточного количества воды, при этом бетонная смесь начинает приобретать связность;

- флокулообразующие силы, возникающие между частицами размером $0,1-2 \cdot 10^{-4}$ мм. Это силы поверхностного взаимодействия твердой и жидкой фазы, имеющие электрическую природу. Из-за измельчения и помола цемента и других тонкодисперсных добавок в клинкере и в добавках рвутся химические связи, на поверхности частиц концентрируются как свободные электроны (радикалы), так и заряженные положительно поверхностные атомы [2]. Происходит притяжение молекул воды к разноименным зарядам кристаллов цемента. Вода во флокулах неподвижна, а объем пор во флокулах большой частицы имеют малые размеры, вследствие чего силы гравитации проявляют себя незначительно;

- коллоидные силы, возникающие между частицами размером $2 \cdot 10^{-4} - 10^{-6}$. Это силы взаимодействия между частицами через возникающую на их поверхности оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы.

Помимо сил между частицами различных уровней возникают динамические связи [2]:

- ковалентные связи, действующие на расстоянии 0,1 – 0,2 нм и имеющие энергию 209 – 6270 кДж/моль;

- ионные связи, радиус действия которых 0,2 – 0,3 нм, а энергия – 4857 кДж/моль;

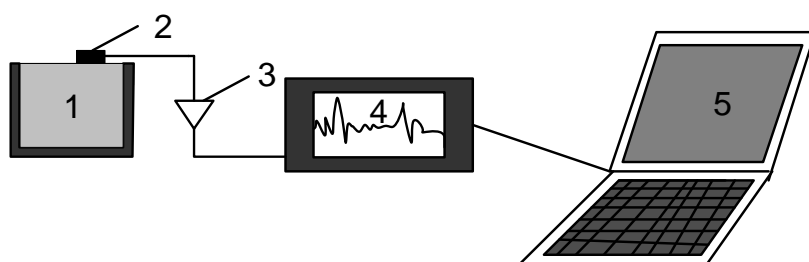
- водородные связи, действующие на расстоянии 0,24 – 0,32 нм, обладающие энергией $\sim 62,7$ кДж/моль;

- криогидратные силы, действующие на расстоянии 0,2 – 0,3 нм, а их энергия составляет $\sim 20,9$ кДж/моль;

- силы дальнего действия, которые действуют на расстояниях 2 – 300 нм, с энергией 4,18 кДж/моль.

Основная часть. Нами были исследованы образцы из свежеприготовленной цементной пасты. С помощью экспериментального оборудования, представленного на рисунке 1, осуществляли регистрацию и анализ параметров сигналов акустической эмиссии цементной пасты с определением структурирования.

В структурно неоднородных материалах, таких как бетон и цементный камень, при распространении акустических волн возникают сложные процессы дисперсии, дифракции, отражения и преломления. Поэтому любые изменения в структуре, а как следствие энергетических и силовых характеристик, повлекут за собой изменения сигнала на выходе преобразователя, трансформирующего акустические колебания в колебания электрического напряжения и обратно. Работа этих преобразователей основана на явлении пьезоэлектрического эффекта. При деформации некоторых диэлектриков происходит несимметричное смещение электрических зарядов и в результате на границах материала возникают некомпенсированные поверхностные заряды. В материале появляется электрическое поле, а на его границах – электрическое напряжение [4]. Посредством анализа показаний нами были выявлены структурные изменения при резких скачкообразных отличиях в амплитуде.



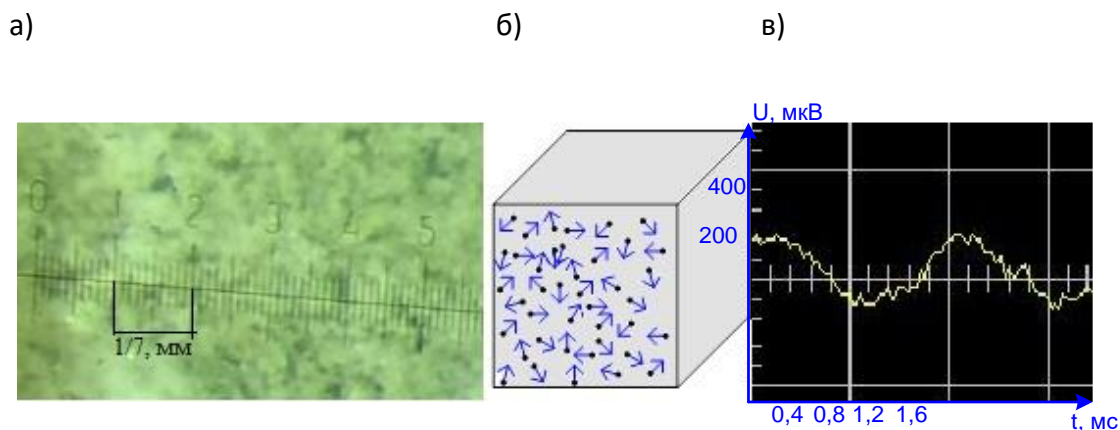
1– образец из свежеприготовленного бетона; 2 – пьезодатчик; 3 – усилитель;
4 – осциллограф; 5 – персональный компьютер

Рисунок 1. – Компановка экспериментального оборудования

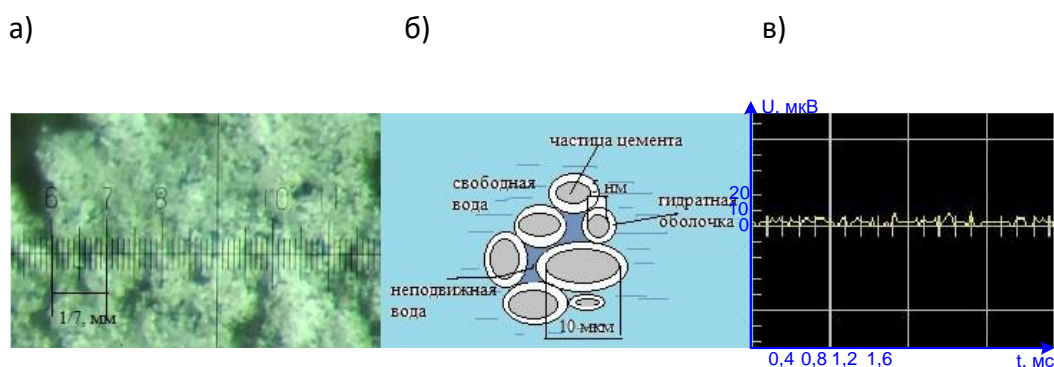
Надмолекулярный уровень (диаметр частиц d лежит в интервале $10^{-9} < d \leq 5 \cdot 10^{-9}$ м) начинается сразу после смешивания цемента и воды. Между частицами возникают внутренние силы взаимодействия, благодаря чему формируется первичный каркас будущей структуры цементного камня, протекающей в объеме коагуляционной структуры свежего цементного теста. Данный процесс сопровождается адсорбцией молекул воды и ослаблением поверхностных сил связи ионов и их комплексов в минералах, в результате чего возникает постоянная бомбардировка молекулами свободной воды поверхности из-за их броуновского движения (рис.2). Возникают контакты между возникшими и уже растущими частицами новой фазы, а также миграция воды и пузырьков газа, наблюдается микроусадка вследствие испарения воды [3]. Эти процессы приводят к потере связи между поверхностными ионами и массой минерала. Основным источником АЭ на данном уровне является подвижность - максимальная амплитуда сигналов $U_{\max} = 200$ мкВ.

На субмикроскопическом уровне ($5 \cdot 10^{-9} < d \leq 10^{-7}$ м) происходят коагуляционное и кристаллизационное структурообразование, формирование порового пространства цементного камня, уменьшение химически несвязанной воды в результате гидратации, возникновение сил поверхностного взаимодействия - флокуляционных. На этом уровне характерно уменьшение подвижности раствора, а значит и снижение активности АЭ (рис. 3). Из-за реакции гидратации, а следовательно, ростом тепловыделения, проис-

ходит диссипация энергии звуковых волн, т.е. затухание сигналов. Отдельные элементы среды, например, поры и инородные включения, имеют различную плотность и скорость распространения падающих звуковых лучей, а значит и различное акустическое сопротивление.



а) увеличенное фото цементной пасты на начальном этапе структурообразования; б) Броуновское движение молекул воды; в) вид сигнала на осциллографе
Рисунок 2



а) увеличенное фото цементной пасты; б) субмикроскопический уровень дисперсности; в) вид сигнала на осциллографе
Рисунок 3

Количество свободной воды уменьшается, благодаря реакции гидратации ионов некоторым количеством молекул воды, в результате чего возникают условия для образования двойного электрического слоя Гемгольца на поверхности непрореагированного цементного зерна. На поверхности твердой фазы появляется слой ионов, прочно скрепленных с массой частиц. За этим слоем ионов в жидкости расположен следующий противоположно заряженный и прочно связанный электростатическими силами с первым слоем ионов. Разность потенциалов между диффузным и адсорбционным слоями двойного слоя (ξ -потенциал) вносит существенный вклад при формировании коагуляционной структуры цементного геля, определяет сущность электрокинетических явлений (связанных с поверхностной проводимостью цементных частиц) и физико-химических процессов, обуславливающих возникновение кристаллогидратной структуры цементного камня [12].

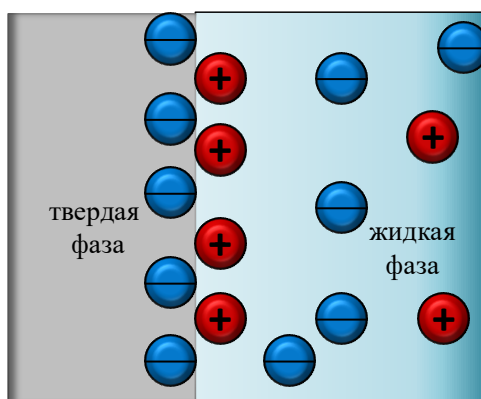
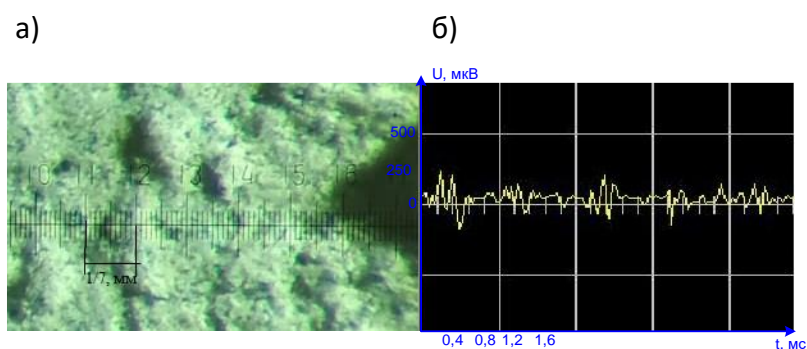


Рисунок 4. – Возникновение двойного электрического слоя

В данном периоде происходит растворение и осаждение продуктов химической реакции, а также образование гидросиликатов кальция коллоидных размеров на поверхности цементных зерен. Коллоидные частицы обладают такими свойствами, как способностью к броуновскому движению, ближней и дальней коагуляции, полупроницаемостью. Однако все вышеперечисленные процессы являются низкоэнергетическими. Учитывая этот факт и высокий коэффициент затухания акустических волн в цементном тесте, структура которого не сформирована на данном уровне, сигналы АЭ претерпевают сильное ослабление [13]. Поэтому данному периоду - периоду стабилизации структурной прочности, характерно практически отсутствие сигналов, интенсивность акустических волн уменьшается, т.е. происходит затухание сигналов - $U_{\max} = 10$ мкВ;

Следующий микроскопический уровень ($10^{-7} < d \leq 5 \cdot 10^{-4}$ м) характеризуется образованием целостной структуры в виде кристаллитов на поверхности цементных зерен. Данный период характеризуется ростом кристаллов в ограниченном объеме, что и является источником сигналов АЭ [6]. А из-за частично сформировавшейся структуры коэффициент затухания звуковых волн значительно ниже, чем в предыдущем периоде, что является следствием увеличения активности и амплитуды регистрируемых сигналов АЭ - $U_{\max} = 250$ мкВ. Этот период плавно переходит в макроскопический уровень, последних два периода считаются самыми продолжительными.



а) увеличенное фото твердеющего цементного камня на микроскопическом уровне; б) вид сигнала на осциллографе

Рисунок 5

Таким образом, акустическая эмиссия чувствительна к захвату многочисленных сигналов упругих волн во время формирования структуры в различных условиях, что

подтверждается результатами, представленными на рисунке 6. Мониторинг ранней стадии материала важен, так как эта стадия в значительной степени определяет конечные свойства затвердевшего цементного камня, поэтому способ АЭ можно применять в качестве исследования состояния структурообразования цементных и бетонных систем. Это объясняется тем, что физико-химические процессы, происходящие внутри цементной пасты, связанные с внутренними структурными изменениями и, как следствие, этапами гидратации, тесно связаны с акустической эмиссией.

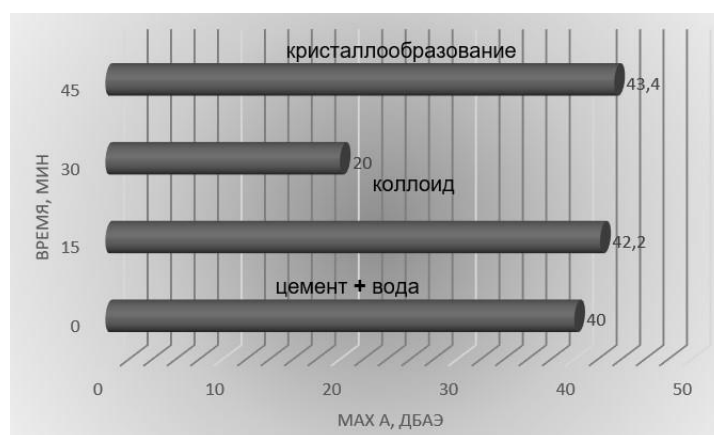


Рисунок 6. – Зависимость максимальной амплитуды от времени твердения образцов

Прочность и деформационные свойства цементного камня предопределяются прочностью связей в кристаллогидратных комплексах и плотностью их упаковки в занимаемом объеме, упругостью и прочностью контактов между структурными составляющими, количеством и сечением пор (дефектов), а также восстанавливающей силой, возникающей под действием внешней нагрузки вследствие релаксационных колебаний и смещений (сдвигов) микро- и макроструктурных элементов [12]. Известно, что чем короче продолжительность периода кристаллизации, тем интенсивнее процесс структурообразования бетона, т. е. тем выше его конечная прочность [6].

Разрушение цементного камня происходит в результате концентрации напряжений в зонах, где градиент внешних сил вызывает пик усилий, обусловленный различием деформативных свойств элементов, их взаиморасположением, формой и объемным содержанием, наличием капиллярных и внутрикристаллогидратных пор [12]. В кристаллогидратных образованиях создаются очаги перенапряжений, которые больше прочности субмикроструктурного элемента, в результате чего он разрушается, перераспределяя напряжения на соседние элементы. Этот процесс носит динамический характер и сопровождается ударной волной. Данный процесс будет затухающим в том случае, если нагрузка на образец не будет превышать критического предела (образование трещин в данном микрообъеме), при возникновении превышения, процесс приобретает лавинообразный характер, приводящий к полному разрушению и разделению образца на части [12].

Выводы. Таким образом, с помощью регистрации данных акустической эмиссии, определена связь между этими сигналами и процесса структурообразования цементного камня. При изучении начальной стадии структурообразования цементных конгломератов становится возможным влиять на процесс гидратации цемента, влиять

на начало и конец схватывания, а также изучать процессы, происходящие при воздействии различных новых добавок в твердеющий бетон и цементный камень. В результате это позволяет достоверно прогнозировать ресурс бетона на начальном этапе и выявлять производственные дефекты. 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. Sokratis N. ILIOPOULOS, Continuous AE monitoring of fresh concrete / Sokratis N. ILIOPOULOS, EvinDzaye, Yassir EL KHATTABI, Dimitrios G. AGGELIS // JSNDI & IIIAE 2016, Progress in Acoustic Emission XVIII, 2016. – P. 293–298.
2. Вернигорова, В.Н. Химия композиционных материалов на неорганических вяжущих: моногр. / В.Н. Вернигорова, К.Н. Махамбетова, С.М. Саденко. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 163 с.
3. Ратинов, В.Б., Розенберг, Т.И. Добавки в Бетон. / В.Б.Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 103 с.
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. Полак, А.Ф. Описание геометрической структуры дисперсных систем / А.Ф. Полак, В.В. Бабков, И.Ш. Фазулин, Р.Г. Хабибуллин // Совершенствование промышленного и гражданского строительства, ч. 2 Строительные материалы и конструкции, 1976. – С.5 - 20.
8. Aggelis, D.G.; Polyzos, D.; Philippidis, T.P. Wave dispersion and attenuation in fresh mortar: theoretical predictions vs. experimental results, Journal of the Mechanics and Physics of solids 2005. – P. 857–883.
9. Koen VAN DEN ABEELE, Geert DE SCHUTTER, Martine WEVERS. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave Spectroscopy, 2006. – P. 1–9.
10. Rustem Gul, Ramazan Demirboga, TekinGuvercin. Compressive strength and ultrasound pulse velocity of mineral admixture mortars. — Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, v. 13, 2006. – P. 18–24.
11. Guang Ye, K. van Breugel, A.L.A. Fraaij. Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age. — HERON, v. 46, 2001. – P. 161–167.
12. Ахвердов И. Н. Основы физики бетона. — М.: Стройиздат, 1981—464 с.
13. 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, Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации [Электронный ресурс]: электронный сборник статей II международной научной конференции, Полоц. гос. ун-т, 2020. - С. 272 – 279.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
АРХИТЕКТУРЫ БЕЛОРУССКОГО ПОДВИНЬЯ
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ**

Электронный сборник статей

МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
(Новополоцк, 26–27 ноября 2020 г.)

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2021

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72(082)

Редакционная коллегия:
Р. М. Платонова (председатель),
В. В. Васильева (отв. секретарь),
Л. М. Парфенова, Е. Д. Лазовский, В. Е. Овсейчик

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ БЕЛОРУССКОГО ПОДВИНЬЯ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ [Электронный ресурс] : электрон. сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Новополоцк, 26–27 нояб. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол.: Р. М. Платонова [и др.]. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2021. – 1 электрон. опт. диск (CD-R).

ISBN 978-985-531-734-1.

Представлены итоги исследований, освещающие проблемы истории архитектуры, градостроительства и искусства, современной архитектуры, дизайна и строительства, научно-методические проблемы преподавания архитектурных, дизайнерских и строительных дисциплин.

Предназначен для специалистов в области архитектуры и проектирования, преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов архитектурных, дизайнерских и строительных специальностей.

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

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 59 95 11, e-mail: r.platonowa@psu.by; u.auseichyk@psu.by

№ госрегистрации 3671815379.

ISBN 978-985-531-734-1

© Полоцкий государственный университет, 2021

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Актуальные проблемы архитектуры Белорусского Подвинья и сопредельных регионов» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
АРХИТЕКТУРЫ БЕЛОРУССКОГО ПОДВИНЬЯ
И СОПРЕДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ**

Электронный сборник статей

МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
(Новополоцк, 26–27 ноября 2020 г.)

Технический редактор *А. А. Прадидова*.
Компьютерная верстка *А. А. Прадидовой*.
Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой*.

Подписано к использованию 27.04.2021.
Объем издания: 11,4 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

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>