

УДК 691.162

МОНИТОРИНГ УРОВНЕЙ ДИНАМИКИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ
МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ
И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА НА ЕГО ЭТАПАХ ТВЕРДЕНИЯ

Д.Н. Шабанов, А.Н. Ягубкин, Е.С. Боровкова

Полоцкий государственный университет, Беларусь

e-mail: d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by, e.borovkova@psu.by

Приводятся результаты экспериментальных исследований акустической эмиссии (АЭ), возбуждаемых в бетонных смесях на основных этапах структурообразования. Также исследовалась АЭ в образцах из цементного камня различного возраста, т.е. в процессе твердения, в режиме одноосного деформирования. Зарегистрированы сигналы АЭ в образцах, отличающихся между собой как по возрасту, так и по прочности. Определена связь между прочностными и АЭ характеристиками каждого образца, а также взаимосвязь между уровнями структуры бетона и сигналов АЭ в эти периоды.

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

MONITORING THE LEVELS OF THE DYNAMICS OF STRUCTURE FORMATION OF A CEMENT STONE
BY THE ACOUSTIC EMISSION METHOD
AND FORECASTING OF THE RESOURCE AT ITS CURING STAGES

D. Shabanov, A. Yagubkin, E. Borovkova

Polotsk State University, Belarus

e-mail: d.shabanov@psu.by, a.yagubkin@psu.by, e.borovkova@psu.by

The results of experimental studies of acoustic emission (AE) excited in concrete mix at the main stages of the formation of cement stone are presented. The researchers also did not have different ages, i.e. during hardening, in uniaxial deformation mode. The recorded AE signals in the samples, as well as in strength. The relationship between the strength and signal elements of each sample, as well as the relationship between the structural levels and EE signals during these periods.

Keywords: acoustic emission, cement stone, structural stages.

Введение. Современное строительство нельзя представить без бетона. Технология производства бетонов основана на химических и физико-химических процессах, протекающих как в бетонной смеси до момента схватывания, так и при твердении бетонов. Знание этих процессов позволит получать бетоны с заданными прогнозируемыми свойствами. На сегодняшний день существует большое количество способов определения прочности бетона с помощью методов как разрушающего, так и неразрушающего контроля, но все они хорошо изучены для материала со сформировавшейся структурой. Поэтому возникает актуальность в разработке и применение новых методик, которые

позволят исследовать свежий бетон и прогнозировать его ресурс еще на стадии твердения. В этой области исследований хорошо себя зарекомендовал метод акустической эмиссии, который позволяет регистрировать внутреннюю структурную активности бетона в процессе его твердения [1].

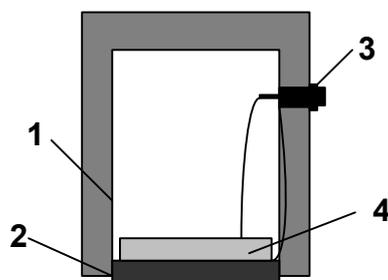
Бетон – искусственный строительный конгломерат представляет собой систему из множества атомов (элементов), развивающегося во времени. Структура бетона чрезвычайно сложна, находится в непрерывном изменении (динамике) с момента приведения компонентов бетона в соприкосновение с водой и до момента потери эксплуатационных свойств структурой бетона. Поскольку свойства бетона, его поведение определяются его структурой, то при каждой обнаруженной в ней перестройки необходимо искать изменение её динамики и, наоборот, за каждым замеченным изменением динамики следует искать преобразование структуры [2].

В строительном материаловедении принято выделять четыре основных периода в процессе структурообразования бетона: растворения (начальный и индукционный периоды), ускоренный (схватывания) и кристаллизации (твердения). Также эти периоды связаны с общей градацией капилляров и структурного каркаса, учитывающего в нем и дефекты. Ведь структура цементного камня представлена твердой фазой и поровым пространством, заполненной жидкостью или газом, причем важнейшие свойства бетона зависят от физических и физико-химических характеристик и каркаса, и порового пространства [3].

Исследовательская часть. Нами были исследованы образцы бетонной смеси и цементного камня в возрасте от 10 минут до нескольких часов, 3-ех, 7-ми, 14-ти и 28-ми суток. Определена связь между прочностными и АЭ характеристиками каждого образца, а также взаимосвязь между уровнями структуры бетона и сигналов АЭ в эти периоды. АЭ аппаратура работает только с электрическими сигналами, поэтому для приема и излучения акустических волн в основном используют пьезоэлектрические преобразователи, трансформирующие акустические колебания в колебания электрического напряжения и обратно. Преимущество пьезоэлектрических преобразователей в том, что они обладают высокой чувствительностью к деформациям и акустическим колебаниям. 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].

Процесс производства бетона начинается с получения бетонной смеси, т.е. сложной многокомпонентной системы. Бетонную смесь получают при затворении водой смеси цемента и заполнителей. Данная смесь представляет начальный период структурообразования, что соответствует надмолекулярному уровню (диаметр частиц d лежит в интервале $10^{-9} < d \leq 5 \cdot 10^{-9}$ м). В нашей работе исследовались образцы без заполнителей и данный период 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 коагуляцион-

ной структуры свежего цементного теста. По физическим свойствам цементные смеси занимают промежуточное состояние между твердыми телами и вязкими жидкостями. С одной стороны, из-за сил вязкого трения, данные смеси обладают структурной вязкостью, а с другой стороны, отсутствием упругости формы и способностью к пластическим деформациям даже при незначительных нагрузках.



1 – корпус, 2 – протектор, 3 – разъем с выводами, 4 – пьезопластина

Рисунок 1. – Конструкция пьезоэлектрического преобразователя

Первоначально этот этап характерен наличием большого количества химически несвязанной (свободной) воды, в результате чего раствор обладает таким свойством, как подвижность, т.е. механическим перемещением смеси и ее отдельных компонент. Это связано с тем, что сразу после контакта поверхности вяжущего и воды начинается процесс растворения минералов клинкера и гипса [5]. 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. Поэтому основным источником АЭ на данном уровне является именно подвижность. Необходимо отметить, что чем больше В/Ц-отношение, тем выше подвижность состава, а значит и выше активность регистрируемых импульсов АЭ.

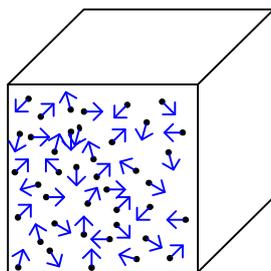


Рисунок 2. – Броуновское движение молекул воды на начальном этапе структурообразования

Второй период структурообразования соответствует субмикроскопическому уровню дисперсности ($5 \cdot 10^{-9} < d \leq 10^{-7} \text{ м}$). На этом этапе происходят коагуляционное и кристаллизационное структурообразование, формирование порового пространства цементного камня, уменьшение химически несвязанной воды в результате гидратации, возникновение сил поверхностного взаимодействия - флокуляционных.

Цемент получают измельчением, помолом, в результате чего в клинкере и в добавках рвутся химические связи, материал измельчается, становится дисперсным и на поверхности частиц концентрируются как свободные электроны (радикалы), так и заряженные положительно поверхностные атомы [2]. Происходит притяжение между положительными ионами и поверхностными радикалами, что способствует образованию флоккул. Часть воды, которая еще не вступила в химическую реакцию, находится в неподвижном состоянии во флоккулах, а их объем пор большей частицы имеют малые размеры, вследствие чего силы гравитации проявляют себя незначительно. Цементная смесь обладает высокой связностью, но требует повышенного расхода воды и имеет малую подвижность, также следует отметить, что при нормальном барометрическом давлении теряется способность к массовой капиллярной конденсации влаги. На этом уровне характерно уменьшение подвижности раствора, а значит и снижение активности АЭ (рис. 3).

Количество свободной воды уменьшается, благодаря реакции гидратации ионов некоторым количеством молекул воды, в результате чего возникают условия для образования двойного электрического слоя на поверхности непрореагированного цементного зерна. Как правило, данное явление связывают с образованием новой фазы, образовавшейся в цементном тесте наряду с имеющимися изначально твердой (непрореагировавшие цементные зерна), жидкой (свободная вода), газообразной (вовлеченный и адсорбированный воздух) [5]. Все эти фазы обладают силами поверхностного натяжения на своих границах.

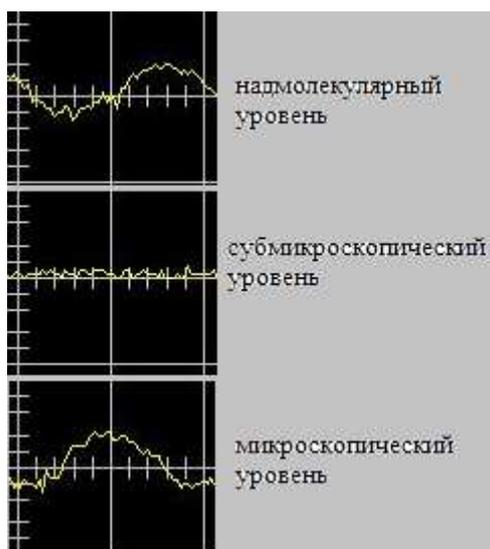


Рисунок 3. – Вид сигналов на осциллографе, возбуждаемых в цементном тесте при различных этапах структурообразования

Из-за реакции гидратации, а как следствие ростом тепловыделения, происходит диссипация энергии звуковых волн, в связи с чем, интенсивность акустических волн уменьшается, т.е. происходит затухание сигналов. К основным причинам затухания звуковых волн можно отнести рассеяние и поглощение. Рассеяние связывают с распространением акустических сигналов в строго не гомогенной среде. Отдельные составляющие среды, например, поры и инородные включения, имеют различную плотность и скорость распространения падающих лучей, а как следствие, и различное акустическое сопротивление (рис.4). Поглощение, как уже говорилось выше, в первую очередь напрямую связано с преобразованием звуковой энергии в тепловую. Как правило, поглощение тем больше, чем быстрее совершаются колебания, то есть чем выше частота звуковой волны. Следовательно, поглощение возрастает пропорционально увеличению частоты, то есть медленнее, чем рассеяние.

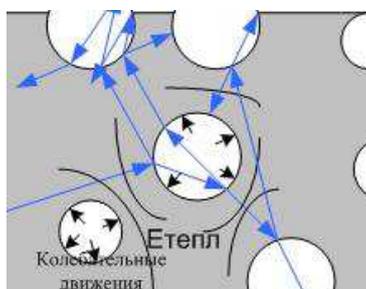


Рисунок 4. – Графическое изображение диссипации звуковой энергии

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. Поэтому данному периоду - периоду стабилизации структурной прочности, характерно практически отсутствие сигналов, что видно из графиков рисунков 3, 5.

Следующий третий период – микроскопический уровень ($10^{-7} < d \leq 5 \cdot 10^{-4}$ м), характеризуется образованием целостной структуры в виде кристаллитов на поверхности цементных зерен. Этот период плавно переходит в четвертый, они считаются самыми продолжительными. Данные периоды 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. К этому уровню относятся и дефекты структуры, возникающие в цементном камне в виде микротрещин при термическом напряжении, усадки.

Также нами были исследованы сигналы АЭ в образцах из цементного камня различного возраста, в режиме одноосного деформирования. На рисунке 6 представлена взаимосвязь между акустическими сигналами и деформационными изменениями в бетонных образцах.

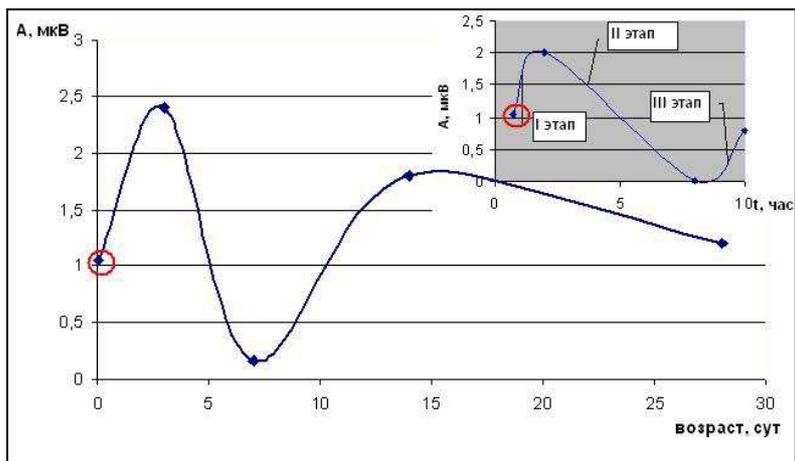
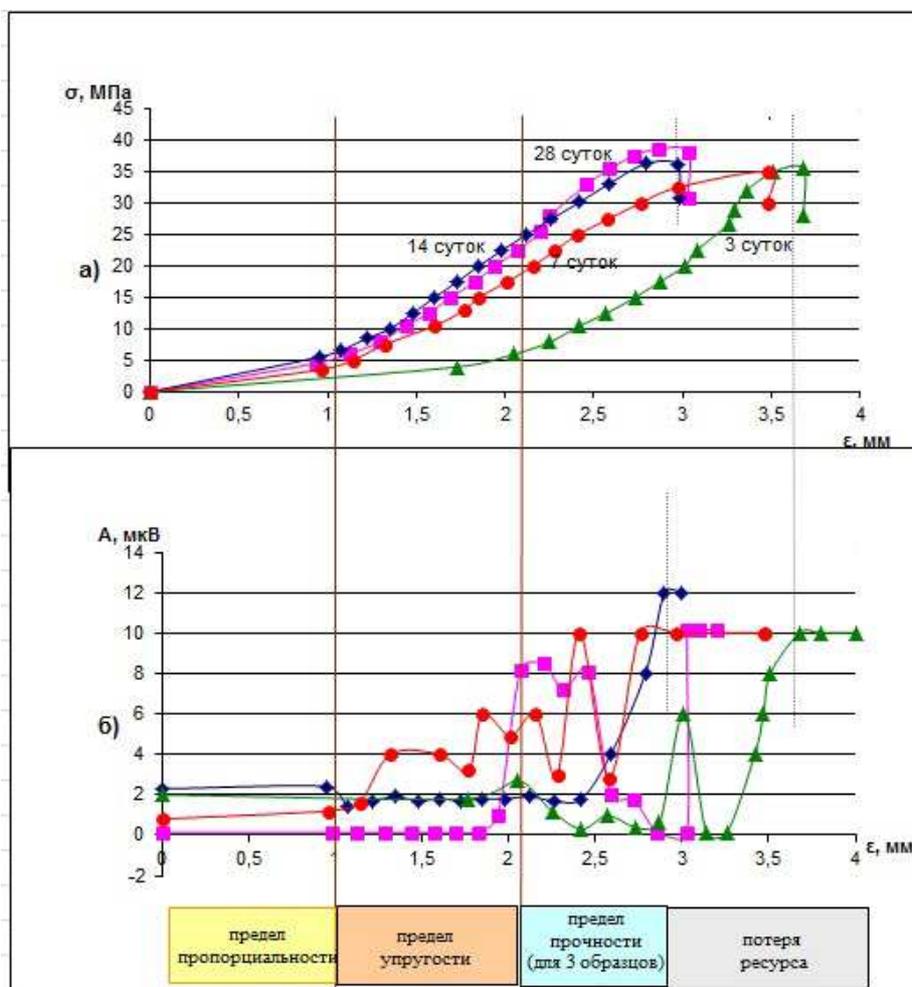


Рисунок 5. – Зависимость максимальной амплитуды сигнала акустической эмиссии от возраста образца



а – зависимость напряжений σ от относительной деформации ϵ ;
 б – зависимость максимальной амплитуды АЭ от деформации ϵ

Рисунок 6. – Взаимосвязь между прочностными и АЭ характеристиками бетонного камня различных возрастов

Образцы 14 и 28 суток по своим прочностным характеристикам практически не отличаются, чего нельзя сказать о сигналах АЭ. Для 14-суточного образца характерно практически отсутствие сигналов в области упругих деформаций, и только при переходе к пластическим деформациям возникает резкое увеличение амплитуды сигналов. Во всех образцах на начальном этапе – участке пропорциональности циклических испытаний генерируются акустико-эмиссионные сигналы, как по активности, так и по величине амплитуды незначительно отличающиеся друг от друга, активность сигналов резко возрастает в момент перехода от упругой деформации к пластическому течению, однако при дальнейшем нагружении образцов, на участке предела прочности наблюдается уменьшение регистрируемых импульсов АЭ, и как у всех исследуемых образцов при приближении к исчерпывающему ресурсу возникает резкое увеличение амплитуды сигналов и выходом на насыщение.

Выводы. Таким образом, с помощью регистрации данных акустической эмиссии, определена связь между этими сигналами и процесса структурообразования цементного камня. Опираясь на приведенные исследования, возникает возможность и ведутся дальнейшие работы в области определения ресурса бетона на этапе формирования его структуры при помощи метода акустической эмиссии в режиме реального времени, а также влияния различных добавок в составе на эволюцию напряженно-деформационного состояния на стадии твердения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sokratis N. ILIOPOULOS, Continuous AE monitoring of fresh concrete / Sokratis N. ILIOPOULOS, Evin Dzaye, 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 WEVER. Non Destructive Online Evaluation of Concrete Hardening Using Acoustic Emission and Harmonic Wave Spectroscopy, 2006. – P. 1–9.
10. Rustem Gul, Ramazan Demirboga, Tekin Guvercin. 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.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

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.*

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 978-985-531-701-3

@Полоцкий государственный университет, 2020

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
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 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>