

УДК 624

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ БЕТОНА И СТАЛЕФИБРОБЕТОНА  
В ДВУХСЛОЙНОМ СЕЧЕНИИ ПРИ ИЗГИБЕ И РАСКАЛЫВАНИИ****Б. Приев, Е. Генина**

Ариэльский университет, Израиль

e-mail: borisp@ariel.ac.il, evgenyag@ariel.ac.il

*Фибробетоны, под которыми подразумеваются дисперсно армированные различными волокнами мелкозернистые бетоны на цементном вяжущем, обладают более высокими, по сравнению с обычными бетонами, физико-механическими свойствами. Дисперсное армирование бетона значительно увеличивает прочность бетона на растяжение, истираемость, а также повышает морозоустойчивость и водонепроницаемость бетонов. Это обусловлено тем, что в несущих элементах эти волокна воспринимают и одновременно перераспределяют растягивающие напряжения. Однако стоимость фибробетона выше чем стоимость обычного бетона. Поэтому использование комбинированных двухслойных сечений экономически целесообразно. Авторы приводят результаты исследования совместной работы двухслойных сечений при изгибе и раскалывании, которые подтверждают надежность соединения двух видов бетона.*

**Ключевые слова:** фибробетон, сталефибробетон, прочность бетона на растяжении при изгибе, прочность бетона при раскалывании, комбинированное двухслойное сечение.

**THE INVESTIGATION OF THE JOINT WORK OF CONCRETE AND FIBER REINFORCED CONCRETE  
IN COMPOSITE TWO-LAYER SECTION DURING BENDING AND SPLITTING****B. Prieв, E. Genin**

Ariel University, Israel

e-mail: borisp@ariel.ac.il, evgenyag@ariel.ac.il

*Fiber reinforced concrete, which means fine-grained concrete with a cement binder, reinforced with steel fibers, have higher physical and mechanical properties than conventional concrete. Dispersed concrete reinforcement by steel fiber significantly increases the tensile strength of concrete, abrasion, and also increases the frost resistance and water resistance of concrete. This is due to the fact that fibers perceive and at the same time redistribute tensile stresses. However, the cost of fiber concrete is higher than the cost of ordinary concrete. Therefore, the use of combined two-layer sections is economically feasible. The authors present the results of the investigation of the joint work of two-layer sections during bending and splitting, which confirm the reliability of the connection of two types of concrete.*

**Keywords:** fiber-reinforced concrete, steel-fiber concrete, tensile strength of concrete under bending, concrete strength during cracking, combined two-layer section.

Как известно фибробетоны, под которыми подразумеваются дисперсно армированные различными волокнами мелкозернистые бетоны на цементном вяжущем, обладают более высокими, по сравнению с обычными бетонами, физико-механическими свойствами, а именно значительно увеличиваются прочность на растяжение, истираемость, а также повышаются морозоустойчивость и водонепроницаемость бетонов. Это обусловлено тем, что в несущих элементах эти волокна как воспринимают, так и одновременно перераспределяют растягивающие напряжения. И это при условии, что волокна в теле бетона распределены равномерно и ориентированы хаотически или регулярно [1].

По материалу армирующего компонента различают:

- сталефибробетон, – если волокна из стали
- стеклофибробетон, – если фибры из стекловолокна. Изучены также волокна из базальта и различных полимерных материалов [2].

Остановимся на сталефибробетоне – это бетон на цементном вяжущем с максимальным размером крупного заполнителя не более 15мм. В эту смесь на стадии изготовления добавляются отрезки стальной проволоки диаметром от 0,25 до 1,0 мм и длиной 50 – 100 мм.

Помимо указанных выше улучшенных физико-механических характеристиках дисперсное армирование также улучшает деформативность бетона, его стойкость к ударным и динамическим воздействиям, а также трещиностойкость. Причем характер развития трещин в сталефибробетонных конструкциях резко отличается от характера развития трещин в железобетонных или армоцементных конструкциях.

Материал сталефибробетон был открыт и запатентован в Советском Союзе в 1947 году В.П. Некрасовым. И явно улучшенные его физико механические свойства предопределили дополнительные исследования материала, причем исследовались и совершенствовались как технология изготовления и укладки, так и методы расчета. Благодаря повышенной стойкости на истирание и устойчивости к динамическим воздействиям, стало возможным в ряде аэропортов мира залить покрытие взлетно-посадочных полос сталефибробетоном (Бельгия, Япония, Германия).

Повышенная водонепроницаемость плюс преднапряжение позволили запроектировать и изготовить большепролетные складки покрытия и отказаться от дорогого кровельного покрытия и от трудоемкого его ремонта в будущем. Такие складки были смонтированы на ряде объектов железнодорожного транспорта Московской области.

В 80-х годах в институте бетона (НИИЖБ) в Москве исследовался вопрос прочности сцепления бетонных поверхностей существующих конструкций с нанесенным позднее слоем сталефибробетона. Выяснилось, что наличие стальной фибры существенно повышает прочность сцепления нового и существующего слоев [1].

Исследование сталефибробетона продолжается и в настоящее время. Так экспериментальные исследования, проведенные Trevor D. Hrynyk and Frank J. Vecchio подтвердили увеличение прочности железобетонных плит со стальным дисперсным армированием. При этом дисперсное армирование положительно влияло на увеличение жесткости плит и сокращение ширины раскрытия трещин [3].

Эффективность двухслойных балок с дисперсным армированием стальной фиброй в сжатой зоне балок из высокопрочного бетона была подтверждена в опытах профессоров Якова Ицхакова и Юрия Рыбакова, поскольку стальные волокна повышают пластические свойства высокопрочного бетона [4,5].

Относительно высокая стоимость стальной фибры ограничивает конкурентоспособность дисперсного армирования бетона. Сравнительные испытания изгибаемых элементов показали, что несущая способность сталефибробетонных балок и балок с комбинированным сечением, сочетающим обычный бетон и сталефибробетон, практически одинакова [6].

В настоящее время сталефибробетон в основном используется в таких областях, как промышленные полы, несъемная опалубка стен. Помимо увеличения несущей способности, одним из основных преимуществ добавления волокон к бетону является потенциальное уменьшение ширины раскрытия трещин, что положительно влияет на долговечность конструкции [7,8].

В Израиле в последние годы, в связи с массовой застройкой городов, власти для каждого возводимого здания требуют устройства подземных стоянок. Иногда приходится возводить 3–4 уровня подвальных этажей, причем расстояние между колоннами здесь не менее 8–9 метров, и, как правило, несущие колонны или стены первого этажа не совпадают с местом расположения колонн подземных этажей. Тогда надземные колонны приходится опирать непосредственно на перекрытие. Это требует либо утолщения перекрытия, либо его локального усиления, поскольку в таких местах появляются значительные усилия продавливания (для справки одна колонна 8 – 9-этажного здания передает нагрузку примерно 1000 тонн).

В 2017 году автором было запроектировано преднапряженное монолитное перекрытие толщиной всего 40 см. Одна из колонн передавала на это перекрытие нормативную нагрузку 250 тонн при расстоянии между опорами порядка 10 метров. Даже максимально допустимое количество кабелей не решало в полной мере проблем продавливания. Тогда возникла идея усилить нижний слой сталефибробетоном. Так нижние 20 см сечения (половина его высоты) были залиты сталефибробетоном класса В50 и 40 кг стальных волокон на куб бетона. По окончании бетонирования нижнего слоя из сталефибробетона, сразу же был залит верхний слой из того же бетона В50, но без волокон. Заливка сопровождалась тщательным вибрированием, чтобы обеспечить проникновение слоев (рис. 1).

Параллельно для исследований были изготовлены призмы сечением 10x10x40 см. Серия двухслойных образцов (5+5)см, серия образцов полностью из сталефибробетона и несколько образцов из обычного бетона той же прочности. Наряду с призмами заливались также и по такому же принципу кубики с размерами ребр 10x10x10 см.

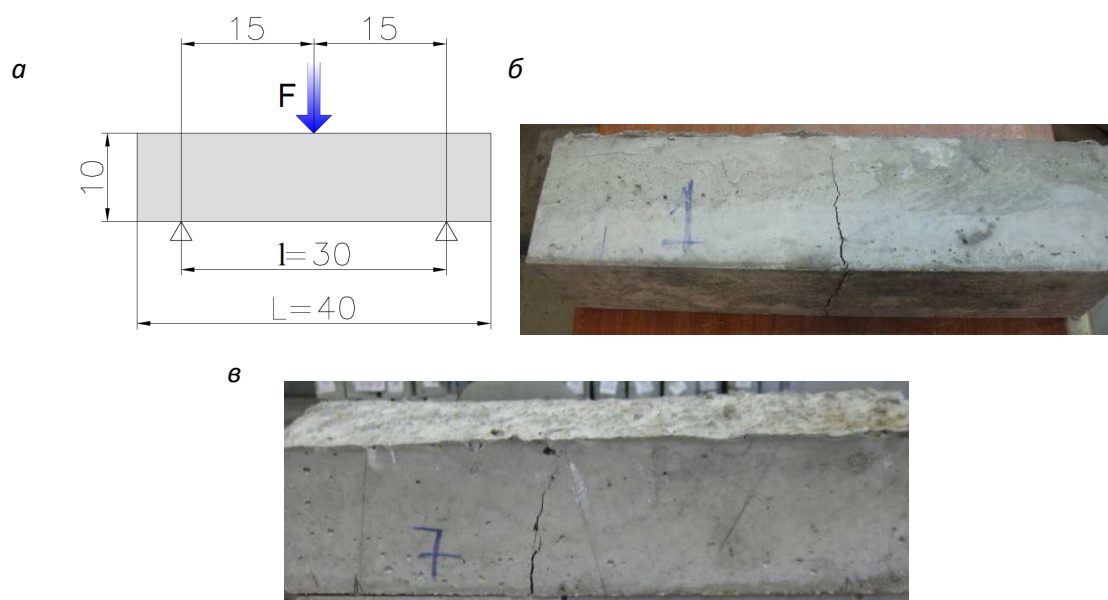
Цель и методика испытания опытных образцов:

- определение прочности на растяжение сталефибробетона в двухслойном сечении;
- определение характера трещинообразования и развития трещин;
- исследование совместной работы бетона и сталефибробетона.



**Рисунок 1. – Бетонирование двухслойного монолитного перекрытия**

Балки испытывались на изгиб по одинаковой статической схеме с постепенным нагружением сосредоточенной нагрузкой в середине пролета. Испытания проводились на стандартном оборудовании с автоматическим выводом результатов на компьютер и графический дисплей. Все призмы, содержащие 5-ти сантиметровый слой сталефибробетона, испытывались таким образом, чтобы этот слой всегда был в растянутой зоне и нагрузка передавалась перпендикулярно этому слою (рис. 2).



**а – схема испытания; б – характер разрушения двухслойной балки;  
в – характер разрушения сталефибробетонной балки**

**Рисунок 2. – Схема испытания балок на изгиб и характер разрушения опытных образцов**

Прочность балок на растяжение при изгибе определялась по методике европейского стандарта EN 12390-5, прочность бетона вычислялась по формуле

$$f_{ct,fl} = \frac{3FL}{2d_2d_1^2}$$

Таблица 1. – Прочность балок на растяжение при изгибе

Материал образцов	Номер образца	Размеры сечения		Разрушающая нагрузка, KN	Нагрузка образования трещин, KN	Разрушающий момент kNm	Прочность EN 12390-5 MPa
		высота см	ширина см				
		d1	d2	F	Fcr	M	f <sub>ct,fl</sub>
Комбинированное двухслойное сечение: бетон В50 и сталефибробетон	1	9.8	10	15.47		1.16	7.10
	2	9.8	9.5	17.182	15.07	1.29	8.74
	3	9.7	10.2	18.065	13.6	1.35	8.06
	4	10.1	9.8	20.738		1.56	9.62
	5	9.9	10	19.207		1.44	8.73
Среднее значение							8.45
Средне квадратичное отклонение							0.94
Бетон В50	6	9.9	10.1	15.96		1.20	7.26
Сталефибробетон	7	9.9	10	17.817		1.34	8.18

Разрушение балок происходило по нормальной трещине в сечении под прикладываемой нагрузкой с максимальным изгибающим моментом. Во всех образцах, на всех этапах нагружения, вплоть до разрушения, наблюдалась совместная работа бетона и сталефибробетона. Не наблюдались трещины или смещения слоев в плоскости контакта слоев. Разрушение всех балок, содержащих стальную фибру, было вязким и происходило вследствие текучести стали и последующего разрыва части стальной фибры (см рис. 4).

Испытание образцов на раскалывание проводилось на стандартном оборудовании (см. рис 3). Кубики испытывались на раскалывание с целью определения прочности на растяжение при раскалывании и изучения совместной работы двух материалов. Кубики раскалывались передачей нагрузки перпендикулярно фибробетонному слою или в плоскости шва между слоями.

Прочность бетона на растяжение при раскалывании определялась по формуле

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d_1 d_2}$$

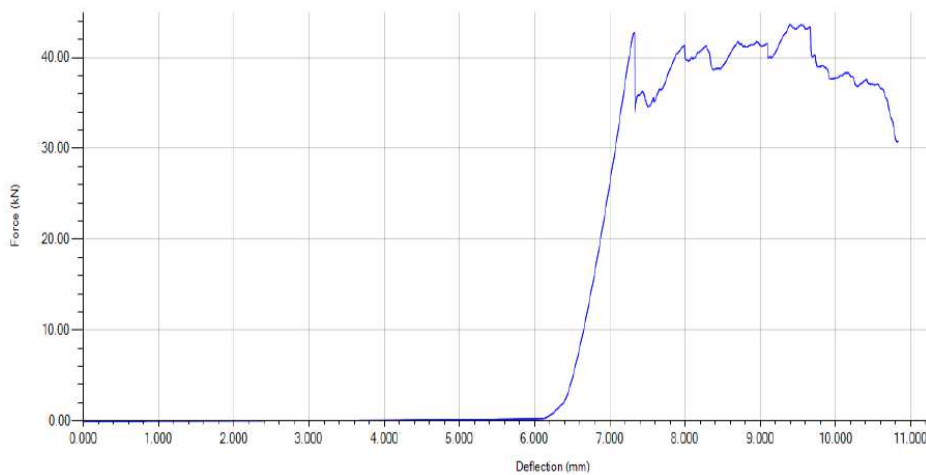
Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Во всех случаях разрушение балок и кубиков, содержащих стальные волокна, было вязким. И кубики, и балки разрушились по критической трещине, которая образовалась первой (см. рис 2, 3). Во всех случаях испытания образцов со стальной фиброй, после образования первой трещины, испытуемый образец продолжал сопротивляться, а кривая на графике продолжала ползти в верх (см. рис 4). Следует также отметить, что при испытаниях абсолютно всех образцов не наблюдалось расслоения слоев из сталефибробетона и из обычного бетона.



**а** – схема испытания; **б** – комбинированное сечение двуслойного образца; **в** – характер разрушения образца с комбинированным двуслойным сечением при раскалывании перпендикулярно слоям, фибробетон внизу; **г** – характер разрушения образца с комбинированным двуслойным сечением при раскалывании в плоскости шва между слоями

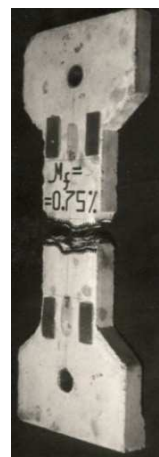
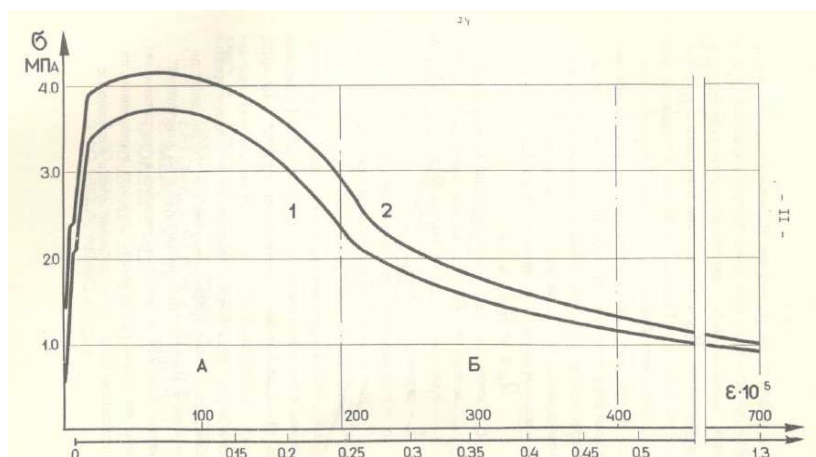
**Рисунок 3. – Схема испытания образцов на раскалывание и характер разрушения опытных образцов:**



**Рисунок 4. – Развитие деформаций при испытании двуслойного образца**

Таблица 2. – Прочность на растяжение при раскалывании

Материал образцов	Направление нагрузки	Номер образца	Размеры сечения, см		Нагрузка образования трещин, КН	Разрушающая нагрузка, КН	Напряжение, МПа	Прочность на растяжение при раскалывании
			высота	ширина				
			d1	d2				
Комбинированное двухслойное сечение: бетон В50 и сталефибробетон	Перпендикулярно слоям	2	9.9	10		69.2	4.45	
		2'	9.9	10		57.16	3.68	
		2''	9.9	10		43.65	2.81	
	Среднее						3.65	2.30
	Параллельно слоям	5	10.00	16.50		60.00	2.32	
		5	10.10	15.40		70.74	2.90	
Среднее						2.61	1.94	
Бетон В50	бетон	6	9.7	9.9		30	1.99	
		8	9.4	9.8		31.82	2.20	
		Среднее						2.09
Комбинированное двухслойное сечение: бетон В50 и сталефибробетон	Перпендикулярно слоям. Нижний слой FRC	3А	10.2	9.5	18.15	60.98	4.01	
		3В	10.6	9.6	28.88	56.85	3.56	
		1А	10.4	10.2	23.51	41.76	2.51	
		1В	10.5	10.2	22.26	49.65	2.95	
		4А	10.3	10.4	61.44	63.28	3.76	
		4В	10.1	10.3		48.3	2.96	
		Среднее						3.29
Фибробетон (FRC)		7А	10.2	9.8	25.62	69.25	4.41	
		7В	10.2	9.9	55.91	83.43	5.26	
		Среднее						4.84



Ширина раскрытия трещин, мм

2 – процент дисперсного армирования  $\mu_f=1,5\%$ ;  
1 – процент дисперсного армирования  $\mu_f=0,75\%$

Рисунок 5. – Развитие деформаций и ширины раскрытия трещин при испытании сталефибробетона на осевое растяжение

Также по результатам испытаний построен общий усредненный график зависимости прочность – деформации. Сравнивая этот график с аналогичным графиком, полученным автором по результатам испытаний сталефибробетонных восьмерок на осевое растяжение, можно увидеть схожесть очертания этих графиков (см. рис. 5). До образования первой трещины – график – это прямая линия, затем четко прослеживается порог трещинообразования, затем продолжение набора прочности уже по кривой, т.е. здесь набор прочности происходит медленнее чем растут деформации. Достигнув аппогея, начинается разгрузка. На первом этапе разгрузки кривая также выпуклая – это говорит

о том, что здесь падение напряжения медленнее, чем рост деформаций, а затем кривая графика становится вогнутой, т.е. на этом участке деформации растут быстрее, чем падает напряжение. Весь участок падения напряжения на графиках объясняется вязкостью разрушения. Порог изменения ниспадающей кривой с выпуклой на вогнутую может быть принят за критерий прочности материала. Это, в свое время, было предложено автором в методике расчета изгибаемых сталефибробетонных элементов на срез.

**Выводы:**

1. К настоящему времени накоплен определенный положительный опыт применения двуслойных конструкций. В случае, когда колонны опираются на перекрытие и передают на него большие нагрузки, было решено локально, только под этими колоннами, залить определенную часть перекрытия по высоте сталефибробетоном и продолжить заливку сразу же, не прерывая процесс, обычным бетоном. Площадь заливки сталефибробетоном эквивалентна площади продавливания, которая рассчитывается заранее.

2. Испытания балок с комбинированным двухслойным сечением показало, что во всех образцах, на всех этапах нагружения, вплоть до разрушения, наблюдалась совместная работа бетона и сталефибробетона. Не наблюдались трещины или смещения слоев в плоскости контакта слоев. Разрушение всех балок, содержащих стальную фибру, было вязким и происходило вследствие текучести стали и последующего разрыва части стальной фибры.

3. Результаты испытаний образцов на раскалывание показали, что не наблюдалось расслоения слоев из сталефибробетона и из обычного бетона.

4. Во всех случаях разрушение балок при изгибе и кубиков при раскалывании, (содержащих в растянутой зоне стальные волокна), было пластичным, вязким. После образования первой трещины стальные волокна воспринимали растягивающие напряжения, достигающие предела текучести.

5. Сочетание отмеченных свойств сталефибробетона с передовыми технологиями, такими как преднапряжение в построечных условиях, торкретирование, локальная или послойная заливки могут в значительной мере повысить качество и несущую способность сооружений, сократив при этом их себестоимость и затраты труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович, Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Монография – М.: Издательство АСВ, 2004.– 560с.
2. Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. Москва, 1987
3. Trevor D. Hrynyk, Frank J. Vecchio. Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Slabs under Impact Load. ACI Structural Journal, V. 111, No. 5, September-October 2014, p 1213–1224.
4. I. Iskhakov, Y. Ribakov. A design method for two-layer beams consisting of normal and fibered high strength concrete. Materials and Design. Volume 28, 2007. Pages 1672–1677
5. I. Iskhakov, Y. Ribakov, K. Holschemacher, T. Mueller. High performance repairing of reinforced concrete structures. Materials and Design. Volume 44, 2013. Pages 216–222



6. Inmaculada Martínez-Pérez, Juozas Valivonis, Remigijus Šalna and Alfonso Cobo-Escamilla. Experimental study of flexural behaviour of layered steel fibre reinforced concrete beams. *Journal of Civil Engineering and Management*, Volume 23 No 6, 2017. Pages 806–813
7. A. Jansson, K. Gylltoft, I. Löfgren, Design methods for fibre-reinforced concrete: a state-of-the-art review. 2008
8. J.A.O. Barros, V.M.C.F. Cunha, A.F. Ribeiro and J.A.B. Antunes. Post-cracking behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. Volume 38 (January-February 2005). Pages 47–56

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>