

УДК 692.5(691.328)

**Л. А. РЯБИЧЕВА, В. В. ЗАСЬКО, Л. Н. ПОЙДА**

Луганский национальный университет имени Владимира Даля

## **АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФИБРОБЕТОНА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Аннотация.** С помощью центрального композиционного ортогонального плана полного факторного эксперимента выполнен анализ влияния состава фибробетона на его физико-механические свойства. Фибра получена из шлифовальных отходов жаропрочной стали. Математической моделью процесса являются функции, связывающие параметры оптимизации: плотность, прочность при сжатии, при растяжении на изгиб с составом фибробетона. Установлено, что увеличение содержания воды затворения в цементе приводит к уменьшению плотности и прочностных свойств; повышение содержания песка в цементе обеспечивает рост плотности и прочностных свойств. Повышение концентрации фибры до 4,5 % приводит к улучшению качества фибробетона. Для увеличения прочностных свойств бетона рекомендуется содержание фибры в цементе в пределах 2,0...4,5 %, что обеспечивает устойчивость показателей прочности и плотности.

**Ключевые слова:** фибробетон, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, плотность, соотношение воды и цемента, а также песка и цемента.

### **ФОРМУЛИРОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ**

Для промышленных регионов характерной особенностью является концентрация нескольких отраслей промышленности, связанных с накоплением промышленных отходов. Одним из направлений по снижению объемов техногенных отходов является вовлечение вторичных продуктов в качестве добавок в состав строительных материалов, в частности при производстве бетонных смесей. Армирование бетонов дисперсными отходами машиностроения обеспечит повышение качества строительных материалов.

### **АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ**

В настоящее время накоплен опыт практического применения композиционных материалов (бетонов) на основе цементных матриц дисперсно-армированных волокнами [1]. Результаты исследований свидетельствуют о целесообразности и эффективности применения дисперсно-армированных бетонов и растворов для изготовления различных строительных изделий [2, 3]. Применение фибробетонов обеспечивает повышение трещиностойкости, ударной стойкости, вязкости разрушения, увеличение прочности на сжатие и растяжение, снижение деформаций усадки и ползучести, повышение износостойкости строительных изделий и конструкций [4].

Повысить прочность бетона при растяжении на изгиб можно введением в него различного вида фибр: металлических, минеральных, синтетических [5, 6]. Фибробетонная композиция образуется объемным сочетанием матрицы из бетона и равномерно распределенных в ней армирующих волокон, а упрочнение бетонов волокнами основано на том, что материал бетонной матрицы посредством касательных сил, действующих на поверхности раздела, передает волокнам приложенную нагрузку. В работе [7] показана возможность применения в качестве армирующей добавки шлифовальных отходов жаропрочной стали 40X10C2M и карбида кремния.

**Целью работы** является проектирование состава фибробетона, упрочненного шлифовальными отходами жаропрочной стали, методом математического планирования эксперимента.

### ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Оценку физико-механических свойств дисперсно-упрочненного бетона выполняли на основе полного трехфакторного эксперимента 23 [8]. Математической моделью процесса являются функции, связывающие параметры оптимизации: плотность, прочность при сжатии, прочность при растяжении на изгиб. При проведении эксперимента варьировали следующими факторами: отношением по массе вода/цемент (В/Ц), цемент/песок ((Ц/П), объемным содержанием фибры в цементе (Ф/Ц). Выбор факторов оптимизации состава бетона производили исходя из технологической и экономической целесообразности и получения материала с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Перечень уровней варьирования принятых факторов приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Факторы и уровни варьирования

Факторы	Обозначение	Уровни варьирования		
		нижний	средний	верхний
Водоцементное отношение В/Ц	$X_1$	0,3	0,4	0,5
Отношение Ц/П	$X_2$	0,33	0,66	0,99
Отношение Ф/Ц	$X_3$	0,5	2,5	4,5

В процессе экспериментальных исследований получены уравнения регрессии, связывающее зависимости основных физико-механических свойств фибробетона от принятых факторов и уровней их варьирования.

$$Y(\rho) = 2637,8 - 0,92X_1 + 0,23X_2 + 0,08X_3 - 1\,401,4X_1X_2 + 67,09X_1X_3 + 5,89X_2X_3;$$

$$Y(R_{сж28}) = 64,14 - 0,89X_1 + 0,33X_2 + 0,02X_3 - 31,0X_1X_2 + 2,24X_1X_3 + 0,04X_2X_3;$$

$$Y(R_{раст28}) = 13,06 - 0,67X_1 + 0,42X_2 + 0,12X_3 - 16,18X_1X_2 + 1,96X_1X_3 + 0,13X_2X_3.$$

Статистический анализ уравнений регрессии оценивали по трем критериям: однородности дисперсий, значимости коэффициентов и адекватности, которую проверяли с помощью критерия Фишера. Полученное значение расчетного критерия Фишера ( $F_p$ ) сравнивали с табличным ( $F_t$ ) в зависимости от числа степеней свободы для принятого уровня значимости. Модель считается адекватной, так как соблюдено условие:  $F_p < F_t$ .

Геометрические интерпретации экспериментально-статистических моделей основных физико-механических свойств фибробетона приведены на рисунках 1–3.

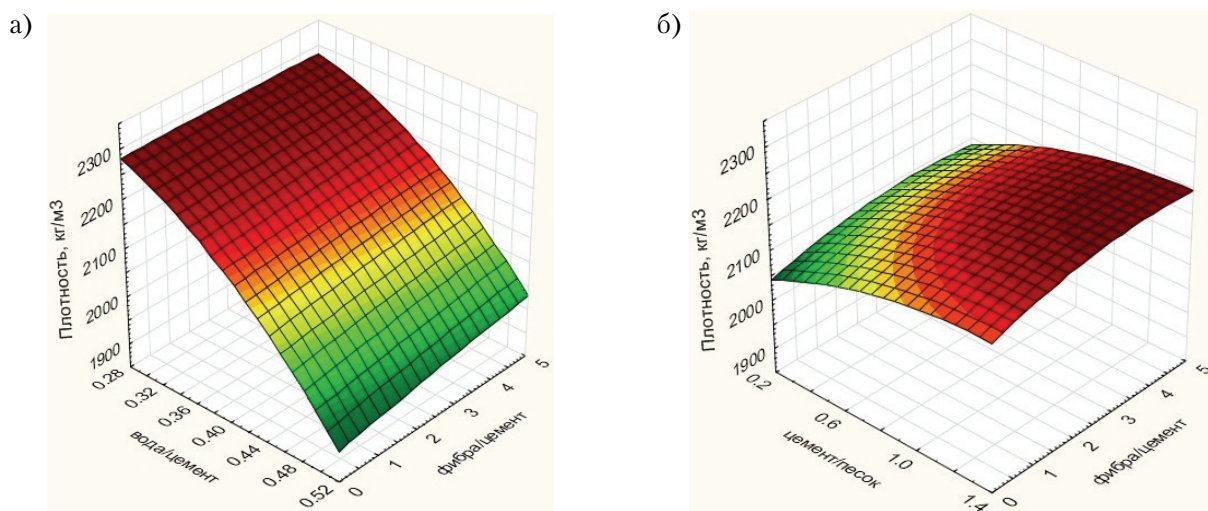
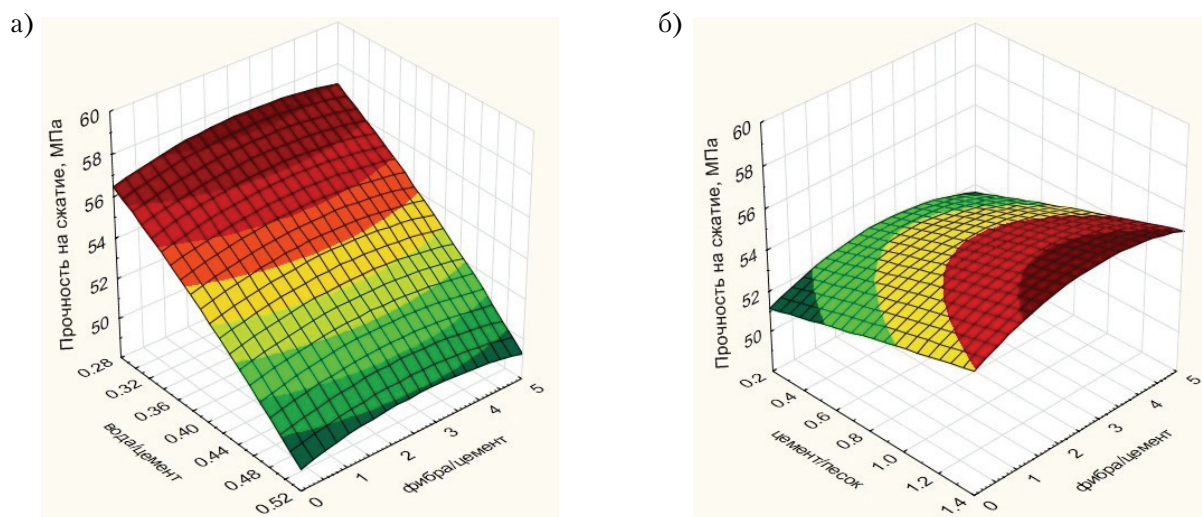
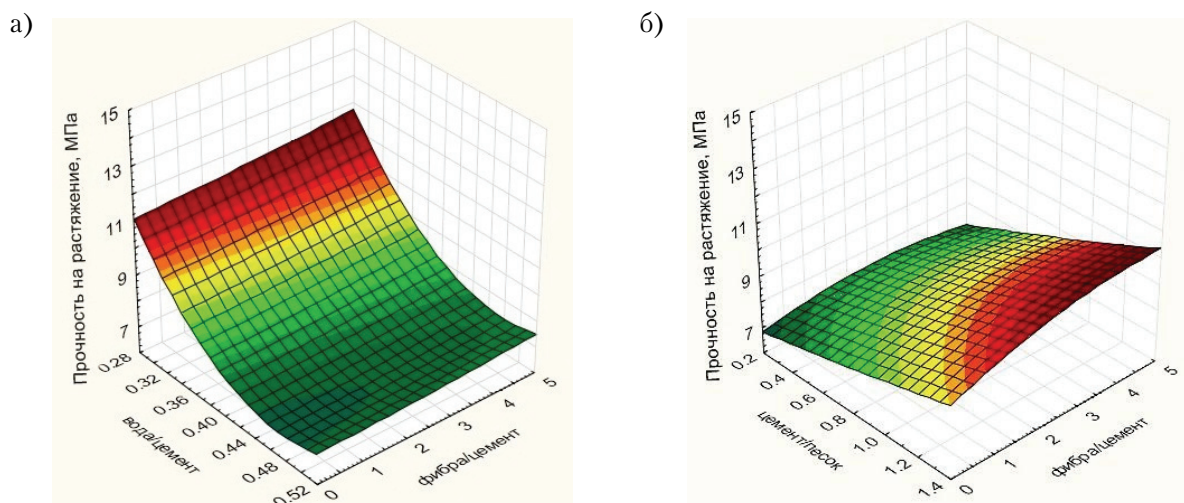


Рисунок 1 – Изоповерхности плотности фибробетона в возрасте 28-ми суток в зависимости от отношения: а) вода/цемент; б) цемент/песок.



**Рисунок 2** – Изоповерхности прочности при сжатии фибробетона в возрасте 28-ми суток в зависимости от отношения: а) вода/цемент; б) цемент/песок.



**Рисунок 3** – Изоповерхности прочности при растяжении на изгиб фибробетона в возрасте 28-ми суток в зависимости от отношения: а) вода/цемент; б) цемент/песок.

Как видно из рисунка 1 а, плотность фибробетона с увеличением содержания воды в цементе уменьшается (плотность не может сжиматься) от  $2\,280\text{ кг/м}^3$  до  $1\,890\text{ кг/м}^3$ , с увеличением содержания фибры до 4,5 % возрастает до  $2\,285\text{ кг/м}^3$ . Содержание песка в цементе в меньшей степени влияет на плотность (рис. 1б). При росте отношения песок/цемент от 0,2 до 1,4 плотность изменяется всего на 2,5 %. Увеличение содержания фибры до 4,5 % приводит к росту плотности до  $2\,200\text{ кг/м}^3$ .

Увеличение времени твердения бетона до 28 суток приводит к устойчивому росту прочности на сжатие в пределах 54...57 МПа при отношении вода/цемент 0,28...0,32 и фибра/цемент 1,5...4,5 % (рис. 2а). Следует отметить, что максимальную прочность материал имеет при отношении фибра/цемент 3 % и при отношении цемент/песок в пределах 1,00...1,32.

Прочность на растяжение при изгибе фибробетона в возрасте 28 суток растет с уменьшением отношения вода/цемент до 11 МПа, а в зависимости от содержания фибры в цементе увеличивается до 11,8 МПа (рис. 3а). Наибольшая прочность на растяжение при изгибе получена при содержании фибры в цементе 4,5 % и цемента в песке 1,32 (рис. 3б).

Следует отметить, что содержание воды в цементе и цемента в песке влияет на прочность фибробетона как при растяжении, так и при сжатии. В общем случае увеличение отношения вода/цемент

приводит к уменьшению плотности и прочностных свойств; увеличение отношения песок/цемент обеспечивает рост плотности и прочностных свойств. Содержание фибры в цементе в пределах 2,0...4,5 обеспечивает устойчивость прочности и плотности.

## ВЫВОДЫ

Методом трехфакторного планирования эксперимента получены уравнения регрессии, описывающие зависимости физико-механических свойств от состава фибробетона. Построены изоповерхности плотности, прочности при сжатии и прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28-ми суток твердения фибробетона. Содержание воды в цементе и песка в цементе влияют на прочность фибробетона при сжатии и растяжении. В общем случае увеличение содержания воды в цементе приводит к снижению плотности и прочностных свойств; увеличение содержания песка в цементе обеспечивает увеличение плотности и прочностных свойств. Для повышения прочностных свойств бетона рекомендуется содержание фибры в цементе в пределах 2,0...4,5 %, что обеспечивает стабильность прочности и плотность.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев, Н. М. К вопросу о классификации стальных фибр для дисперсного армирования бетонов [Текст] / Н. М. Михеев, К. В. Талантова // Бетон и железобетон. – 2003. – № 2. – С. 9–11.
2. Талантова, К. В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетонов [Текст] / К. В. Талантова // Известия вузов. Строительство. – Новосибирск, 2008. – № 10. – С. 4–9.
3. Волков, И. В. Фибробетон: состояние и перспективы применения [Текст] / И. В. Волков // Промышленное и гражданское строительство. – 2002. – № 8. – С. 37–38.
4. Schmidt, M. Ultra-Hochfester Beton: Perspektive fur die Betonfertigteiling industrial [Текст] / M. Schmidt // Betonwerk+Fertigtal-Technik. – 2003. – № 3. – S. 16–29.
5. Буров, Ю. С. Технология строительных материалов и изделий [Текст] / Ю. С. Буров. – М. : Высшая школа, 1972. – 464 с.
6. Бутт, Ю. М. Технология вяжущих веществ [Текст] / Ю. М. Бутт, С. Д. Ожороков, М. М. Сычев [и др.]. – М. : Высшая школа, 1965. – 619 с.
7. Рябичева, Л. А. Использование отходов шлифования автомобильных клапанов в строительных материалах ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении [Текст] / Л.А. Рябичева, В.В. Засько // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением в машиностроении : Сб. науч. трудов. – 2016. – № 2(17). – С. 186–192.
8. Адлер, Ю. П. Введение в планирование эксперимента [Текст] / Ю. П. Адлер. – М. : Металлургия, 1969. – 159 с.

Получено 09.01.2017

### Л. О. РЯБІЧЕВА, В. В. ЗАСЬКО, Л. М. ПОЙДА АНАЛІЗ ЯКОСТІ ФІБРОБЕТОНУ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Луганський національний університет імені Володимира Даля

**Анотація.** З зростанням центрального композиційного ортогонального плану повного факторного експерименту виконано аналіз впливу складу фибробетону на його фізико-механічні властивості. Фібру отримано із шліфувальних відходів жароміцної сталі. Математичною моделлю є функції, які пов'язують параметри оптимізації: щільність, міцність при стисканні, при розтягу на згинанні зі складом фибробетону. Підвищення кількості води у цементі привде до зменшення щільності та міцності; збільшення кількості піску у цементі забезпечує збільшення підвищення щільності та міцності. Збільшення кількості фибри до 4,5 % привде до поліпшення якості фибробетону. Для збільшення міцності бетону рекомендується масова концентрація фибри у цементі 2,0...4,5 %, що забезпечує запропоновану міцність та щільність.

**Ключові слова:** фибробетон, міцність при стисканні, міцність при розтягу на згинанні, щільність, відношення води і цементу, а також піску і цементу.

LYUDMULA RYABICHEVA, VITALI ZACKO, LEONID POIDA  
ANALYSIS OF QUALITY OF FIBROUS CONCRETE BY METHOD OF  
MATHEMATICAL PLANNING OF EXPERIMENT

Vladimir Dahl Lugansk National University

**Abstract.** With orthogonal central composite plan of full factorial experiment it has been analyzed the effect of fiber-reinforced concrete structure on its physical and mechanical properties. Fiber has been obtained from the grinding of waste heat resistant steel. The mathematical model of the process is a function of linking optimization parameters: density, compressive strength, tensile bending with the composition of fiber-reinforced concrete. It has been found out an increase in water content of the cement mixing reduces the density and strength properties; increase in the content of sand in the cement provides a growth density and strength properties. Increasing concentration to 4,5 % fiber results in an improved quality of fiber-reinforced concrete. To increase the strength properties of the concrete it has been recommended the fibers content in the cement in the range of 2,0...4,5 %, which ensures the stability of the strength and density.

**Key words:** fibrous concrete, the compressive strength, tensile strength in bending, a density ratio of water and cement, and sand and cement.

**Рябичева Людмила Александровна** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: получение новых материалов со специальными свойствами из отходов промышленности.

**Засько Виталий Васильевич** – старший преподаватель кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: перспективные строительные материалы.

**Пойда Леонид Николаевич** – старший преподаватель кафедры материаловедения и строительства Луганского национального университета имени Владимира Даля. Научные интересы: компьютерное моделирование строительных изделий, расчеты на прочность.

**Рябичева Людмила Олександрівна** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства і будівництва Луганського національного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: одержання нових матеріалів зі спеціальними властивостями із відходів промисловості.

**Засько Віталій Васильович** – старший викладач кафедри матеріалознавства і будівництва Луганського національного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: перспективні будівельні матеріали.

**Пойда Леонид Миколайович** – старший викладач кафедри матеріалознавства і будівництва Луганського національного університету імені Володимира Даля. Наукові інтереси: комп'ютерне моделювання будівельних виробів, розрахунки на міцність.

**Ryabicheva Lyudmula** – D.Sc. (Eng), Associate Professor, Head of the Material and Civil Engineering Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: receiving new materials with special properties from waste of the industry.

**Zacko Vitali** – senior teacher, Material and Civil Engineering Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: perspective construction material.

**Poyda Leonid** – senior teacher, Material and Civil Engineering Department, Vladimir Dahl Lugansk National University. Scientific interest: computer modeling of construction products, calculations on durability.