

# МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 614

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>

## Проектирование и анализ методом конечных элементов экологически безопасных моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров

С.В. Клюев<sup>1</sup> , А.В. Клюев<sup>1</sup> , Н.А. Аюбов<sup>2</sup> , Р.С. Федюк<sup>3</sup>  , Е.В. Левкина<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород, Российская Федерация

<sup>2</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук, г. Грозный, Российская Федерация

<sup>3</sup> Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Российская Федерация

✉ [roman44@ya.ru](mailto:roman44@ya.ru)



EDN: UKVSSN

### Аннотация

**Введение.** Улучшение экологии предполагает переработку техногенных материалов для получения продукции с высокими эксплуатационными характеристиками. Однако в строительстве в целом безальтернативны энергоемкие и неэкономичные материалы. Литературные сведения по проблеме недостаточны и разрознены. Представленная статья призвана восполнить этот пробел. Цель работы — исследование моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. Для достижения цели решались две задачи: проектирование полимеров и анализ балок из них методом конечных элементов.

**Материалы и методы.** Вяжущей основой фиброгеополимеров служили спекшиеся частицы (корольки) из отходов техногенных волокнистых материалов (ТВМ), а именно из базальтовой ваты. Фибру изготавливали из металлокорда, отходов базальтовой ваты и полипропилена. Балки из гибридноармированных фиброгеополимеров изучали при изгибе и сдвиге в программной среде Ansys 16.1.

**Результаты исследования.** Получены два вида геополимеров:

– моноармированные (фибра из металлокорда, полипропиленовая фибра и ТВМ – фибра из отходов производства базальтовой ваты);

– гибриднофиброармированные (металлокорд + полипропилен, металлокорд + ТВМ, полипропилен + ТВМ).

Выявили высокие значения модуля упругости (более 25 ГПа), прочности при изгибе (до 10,19 МПа) и сжатии (до 46,67 МПа). Отношение прочности при изгибе и сжатии для исследуемых и традиционных материалов — 1:4 и 1:10 соответственно. Сравнили смоделированные и экспериментальные показатели прогибов балок при нагрузках от 5 до 72 кН. Выяснили, что конечноэлементное моделирование позволяет проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики.

**Обсуждение.** Установлены случаи наименьшего расхождения данных моделирования и опытов. Для ФГП-1 это 8 % (нагрузка — 35 кН), для ФГП-2 — 11 % (50 кН), для ФГП-3 — 7 % (38 кН), для ФГП-1 (1) — 3 % (30 кН). Среди гибридноармированных фиброгеополимеров наилучшее соответствие — у ГФГП-3. При нагрузке 55 кН расхождение — 0,80 % (теория — 4,98 мм, опыт — 5,02 мм). Для ГФГП-1 лучший показатель — 1,85 % (72 кН, 5,85 мм, 5,96 мм), для ГФГП-2 — 9,12 % (63 кН, 5,58 мм, 6,14 мм). Прикладную ценность результатов подтвердила их визуализация — схожесть и совпадение кривых на графиках.

**Заключение.** Доказаны преимущества предложенных инновационных компонентов для производства строительных материалов. Они экологичны, демонстрируют достаточную удобоукладываемость. Проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров дает возможность получить высокие значения прочности при изгибе и сжатии (существенно выше, чем у неармированных бетонов). Модуль упругости более 25 ГПа доказывает хорошее сопротивление материала деформациям. Итоги моделирования адекватны результатам экспериментов.

**Ключевые слова:** моноармированные фиброгеополимеры, гибридноармированные фиброгеополимеры, переработка техногенного сырья, техногенные волокнистые материалы, технические свойства фибр, геополимерный бетон

**Благодарности.** Авторы благодарны анонимным рецензентам за уделенное время и ценные комментарии.

**Финансирование.** Работа опубликована при финансовой поддержке РФФ, проект № 25–19–00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

**Для цитирования.** Клюев С.В., Клюев А.В., Аюбов Н.А., Федюк Р.С., Левкина Е.В. Проектирование и анализ методом конечных элементов экологически безопасных моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):171–185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>

*Original Empirical Research*

## Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers

Sergey V. Klyuev<sup>1</sup> , Alexander V. Klyuev<sup>1</sup> , Narman A. Ayubov<sup>2</sup> ,

Roman S. Fediuk<sup>3</sup>  , Elena V. Levkina<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> V.G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russian Federation

<sup>2</sup> Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russian Federation

<sup>3</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

 [roman44@ya.ru](mailto:roman44@ya.ru)

### Abstract

**Introduction.** Environmental improvement involves the recycling of man-made materials for product recovery with high performance characteristics. However, in general, energy-intensive and uneconomical materials have no alternative in construction. Literary information on the problem is insufficient and uncompiled. The presented article is intended to fill this gap. The research objective is to study mono-reinforced and hybrid-reinforced fibergeopolymers. For this purpose, two problems are solved: design of polymers and analysis of beams made from them using the finite element method.

**Materials and Methods.** The binding base for the production of fibergeopolymers was sintered particles (beads) extracted from basalt wool waste — technogenic fibrous materials (TFM). The fiber was made from metal cord, basalt wool waste and polypropylene. Beams made from hybrid-reinforced fibergeopolymers were studied under bending and shear in the ANSYS 16.1 software environment.

**Results.** Two types of geopolymers were obtained:

- mono-reinforced (fiber from metal cord, polypropylene fiber, and TFM – fiber from waste from basalt wool production);
- hybrid-fiber-reinforced (metal cord + polypropylene, metal cord + TFM, polypropylene + TFM).

High values of elastic modulus (more than 25 GPa), bending strength (up to 10.19 MPa) and compression strength (up to 46.67 MPa) were defined. The ratio of bending and compression strength for the studied and traditional materials was 1:4 and 1:10, respectively. The simulated and experimental indicators of beam deflections under loads from 5 to 72 kN were compared. It was found that finite element modeling allowed designing structures from the developed materials and predicting their performance characteristics.

**Discussion.** The cases of the smallest discrepancy between the modeling and experimental data were established. For FGP-1, it was 8% (load — 35 kN), for FGP-2 — 11% (50 kN), for FGP-3 — 7% (38 kN), for HFGP-1 (1%) — 3% (30 kN). Among the hybrid-reinforced fibergeopolymers, the best compliance was that of HFGP-3. At a load of 55 kN, the discrepancy was 0.80% (theory — 4.98 mm, experiment — 5.02 mm). For HFGP-1, the best indicator was 1.85% (72 kN, 5.85 mm, 5.96 mm), for HFGP-2 — 9.12% (63 kN, 5.58 mm, 6.14 mm). The applied value of the results was confirmed by their visualization – the similarity and coincidence of the curves on the graphs.

**Conclusion.** The advantages of the proposed innovative components for the production of building materials are proved. They are environmentally friendly and show sufficient workability. Design of hybrid-reinforced fibergeopolymers makes it possible to obtain high values of bending and compression strength (significantly higher than that of unreinforced concrete). The modulus of elasticity of more than 25 GPa proves good resistance of the material to deformations. The results of the modeling are adequate to the results of the experiments.

**Keywords:** mono-reinforced fibergeopolymers, hybrid-reinforced fibergeopolymers, processing of technogenic raw materials, technogenic fibrous materials, technical properties of fibers, geopolymer concrete

**Acknowledgements.** The authors would like to thank the anonymous reviewers for their time and valuable comments.

**Funding Information.** The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 25–19–00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

**For Citation.** Klyuev SV, Klyuev AV, Ayubov NA, Fediuk RS, Levkina EV. Finite Element Design and Analysis of Sustainable Mono-Reinforced and Hybrid-Reinforced Fibergeopolymers. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):171–185. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-171-185>

**Введение.** Один из приоритетов стратегии научно-технического развития Российской Федерации — противодействие техногенным, биогенным, социокультурным и иным источникам опасности для общества и экономики [1]. Важнейшая задача экологической безопасности — разработка технологических способов и технических средств [2], ресурсосбережения [3] и комплексной переработки техногенных материалов [4], получение на их основе продукции с высокими эксплуатационными характеристиками [5].

Трансдисциплинарные подходы обеспечивают новый уровень развития строительных композиционных смесей. Для прогресса в этой сфере важно уйти от действующих шаблонов проектирования строительных материалов [6]. Для снижения сложности рецептур и стоимости компонентов следует использовать данные различных наук: материаловедения, физики, химии, геологии, нанотехнологий и т. д. К тому же новому композиту можно задать определенные эксплуатационные характеристики [7].

Улучшение физико-механических, эксплуатационных, защитных и экологических свойств современных модифицированных композитов базируется на:

- оптимизации рецептур и технологий;
- использовании нетрадиционных видов природного и техногенного сырья [8].

Известно, что экономическая эффективность проектов во многом определяется применением высокотехнологичных стройматериалов [9]. У современных композитов — хорошие перспективы в промышленном и гражданском строительстве [9]. Нередко их используют для уникальных проектов и объектов, которые будут эксплуатироваться в различных условиях [10].

При производстве описанных выше материалов, как правило, задействуют одну из двух инновационных стратегий:

- рециклинг для производства так называемых «зеленых» материалов [11];
- создание «умных» бетонов для мониторинга состояния строительных конструкций [12].

Отметим, что в нормативной базе, регулирующей строительное проектирование, нет рекомендаций по использованию техногенных отходов в качестве наполнителей для бетона. Перспективные подходы обсуждаются в литературе. Как правило, речь идет о комплексной переработке отслуживших шин, а также о волокнистых материалах — техногенных отходах производства минеральной ваты [13]. Однако оба эти решения недостаточно изучены и протестированы на практике.

Следует упомянуть также возможность применения технического углерода и отходов ТВМ. Однако и в этом случае нет адекватных научных выводов, которые доказали бы практическую целесообразность внедрения таких композитов в строительную практику [14].

Цель представленной работы — исследование и проектирование методом конечных элементов неармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров. В рамках данного исследования решали две задачи: проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров и анализ балок из них методом конечных элементов. Это необходимо для реализации заявленной цели, а также в целом для создания экологически безопасных строительных материалов.

**Материалы и методы.** Вяжущей основой для изготовления фиброгеополимеров служили спекшиеся частицы (корольки), извлеченные из отходов базальтовой ваты — техногенных волокнистых материалов (ТВМ). В качестве щелочной активирующей жидкости использовалась комбинация раствора силиката натрия и гидроксида натрия. Мелким наполнителем выступал полифракционный кварцевый песок с удельным весом 2,67. Максимальный размер крупного наполнителя, используемого в этом исследовании, не превышает 12 мм, что увеличивает удобоукладываемость бетона. Фибру из металлокорда отработавших шин термически обрабатывали и нарезали. Фибру из ТВМ получали путем измельчения базальтовой ваты. Авторы установили, что иногда реальные технические свойства фибр отличаются от заявленных производителями, и именно эти, настоящие, параметры приводятся в таблице 1.

Таблица 1

## Свойства различных видов фибры

Свойства	Металлокордовая	Полипропиленовая	ТВМ
Диаметр, мм	0,75	0,002	0,013
Длина, мм	60–75	12,0	40–70
Соотношение длины к диаметру	80–100	6 000	3 077–5 385
Прочность на растяжение, МПа	2 500	3,50	2 000
Модуль упругости, МПа	210	3,45	75 000
Удельный вес	8	0,90	2,60

Изучали поведение балок размером 1 000×200×100 мм из гибридноармированных фиброгеополимеров. Их анализировали методом конечных элементов при изгибе и сдвиге. Прогиб геополимербетонных балок считают, чтобы предотвратить недопустимые деформации и обеспечить нормальную эксплуатацию конструкций. Метод конечных элементов подходит для компьютерной обработки, может применяться в решении задач по механике твердого тела, механике жидкости, теплопередаче и вибрациям.

**Результаты исследования.** Разработаны составы экологически безопасных фиброгеополимерных смесей, которые показали удовлетворительные характеристики удобоукладываемости (таблица 2). Удобоукладываемость обеспечивает качественную, безопасную транспортировку геополимерной смеси к месту укладки.

Таблица 2

## Разработанные составы и результаты измерения осадки конуса

Состав	Содержание фибры, % по объему	Осадка, мм	Удобоукладываемость
Цементобетон	–	112,1	Высокая
Неармированный геополимер (ГП)	–	103,5	Высокая
Фиброгеополимер (ФГП-1), металлокорд	0,5	80,3	Средняя
ФГП-2, полипропилен	0,5	78,4	Средняя
ФГП-3, ТВМ	0,5	76,5	Средняя
Гибридный фиброгеополимер (ГФГП-1), металлокорд + полипропилен	0,25 + 0,25	65,4	Средняя
ГФГП-2, металлокорд + ТВМ	0,25 + 0,25	70,2	Средняя
ГФГП-3, ТВМ + полипропилен	0,25 + 0,25	68,7	Средняя

Композиты затвердевали в течение 28 дней при обычных, специально не заданных условиях. Их итоговые механические свойства обобщены в таблице 3. Доказаны высокие значения прочности при сжатии (до 46,67 МПа) и изгибе (до 10,19 МПа). Установлена крайне важная разница в показателях отношения прочности при изгибе и сжатии для исследуемых и традиционных материалов — 1:4 и 1:10 соответственно. Высокий модуль упругости (более 25 ГПа) особенно значим для проектировщиков и инженеров, т.к. определяет способность материала сопротивляться деформациям, то есть прочность и устойчивость строительных конструкций. Составы с наилучшими характеристиками в таблице 3 выделены цветом.

Таблица 3

## Механические свойства композитных материалов после затвердевания в течение 28 дней

Состав	Прочность, МПа		Модуль упругости, ГПа
	на сжатие	на изгиб	
Цементобетон	40,89	4,60	19,24
Неармированный геополимер (ГП)	41,33	4,40	19,32
Фиброгеополимер (ФГП-1)	46,67	8,79	25,01
ФГП-2	45,78	8,60	24,57
ФГП-3	34,67	8,00	20,02
Гибридный фиброгеополимер (ГФГП-1)	46,67	8,39	25,03
ГФГП-2	44,44	10,19	23,49
ГФГП-3	40,44	9,50	20,11

Задачи статики решались методом конечных элементов. Ниже описана последовательность анализа в программной среде Ansys.

1. Задание алгоритма.
2. Указание геометрии.
3. Указание и определение свойств материала (модуль упругости и коэффициент Пуассона).

Для моделирования использовали геополимерную балку с тремя степенями свободы в каждом узле. Она перемещается и упруго деформируется в направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Модуль упругости бетона:

$$E_c = 5\,000\sqrt{R_{сж.}}, \quad (1)$$

где  $E_c$  — кратковременный статический модуль упругости, МПа;  $R_{сж.}$  — прочность при сжатии, МПа.

Коэффициент Пуассона обычно меньше 0,5. В [15] приводятся значения от 0,18 до 0,24, в [16] называли цифры от 0,23 до 0,32.

Сетчатая разбивка производится на основе геометрии структуры. Визуализация анализа на изгиб в Ansys представлена на рис. 1–11.

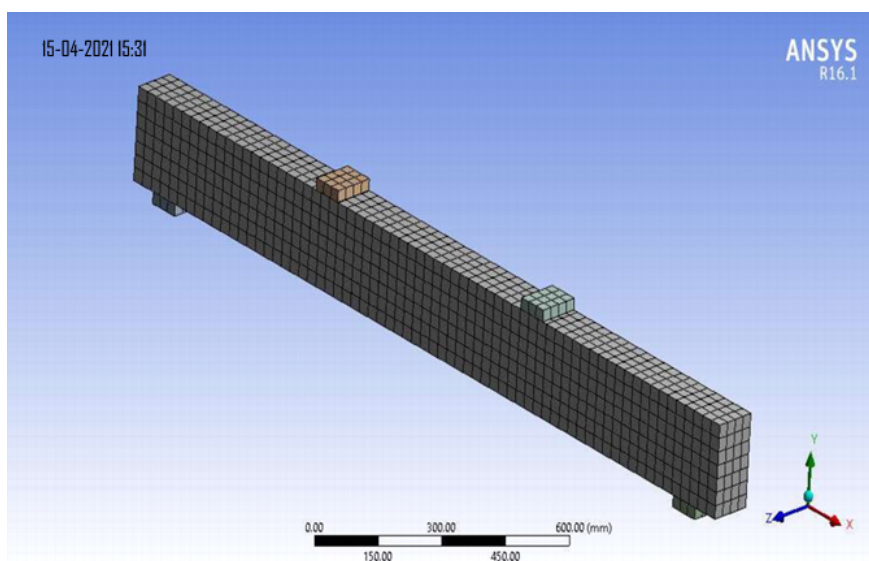


Рис. 1. Дискретизация балки

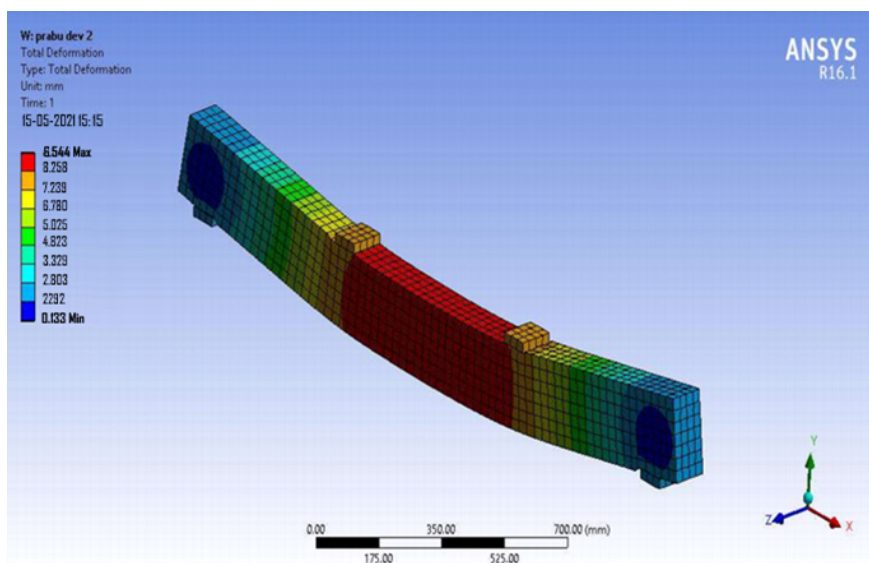


Рис. 2. Деформация балки ФГП-1

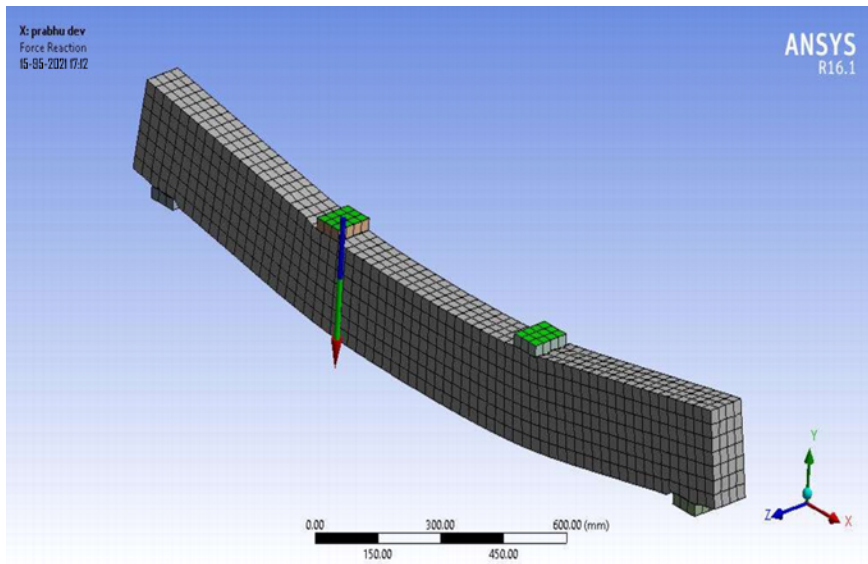


Рис. 3. Прогиб балки ФП-1

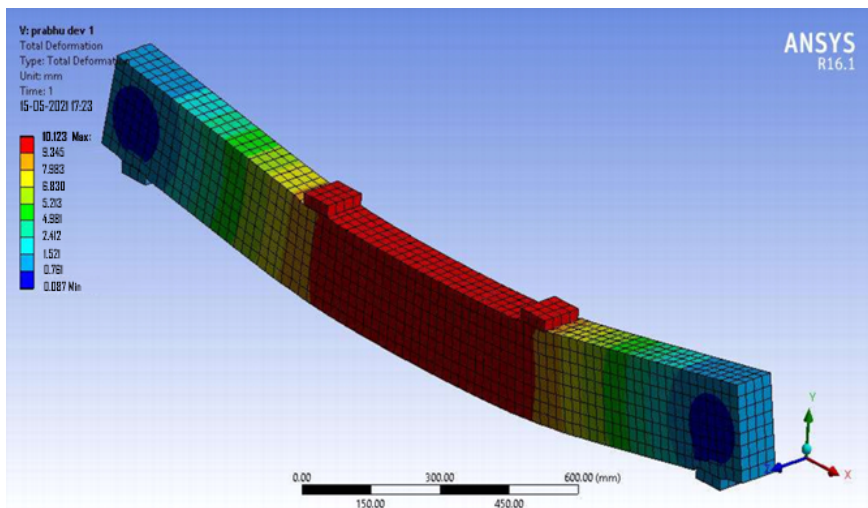


Рис. 4. Деформация балки ГП

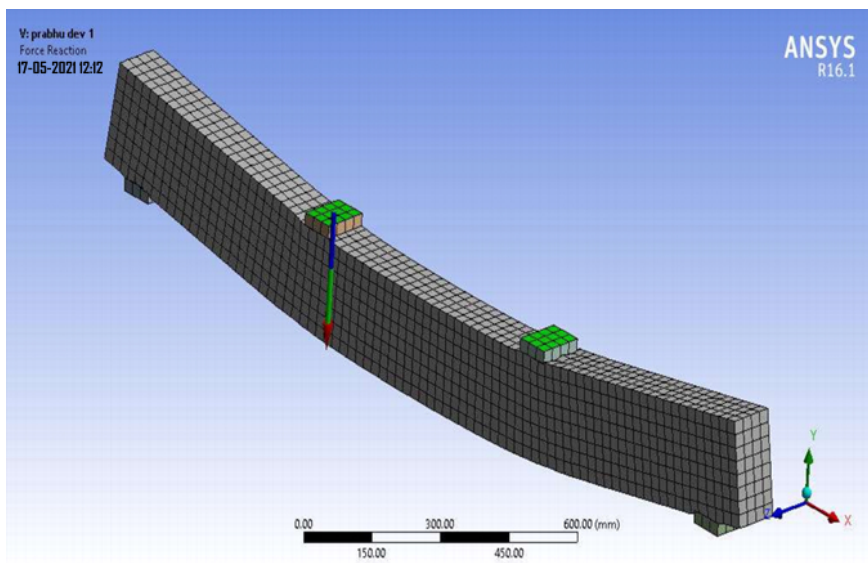


Рис. 5. Прогиб балки ГП

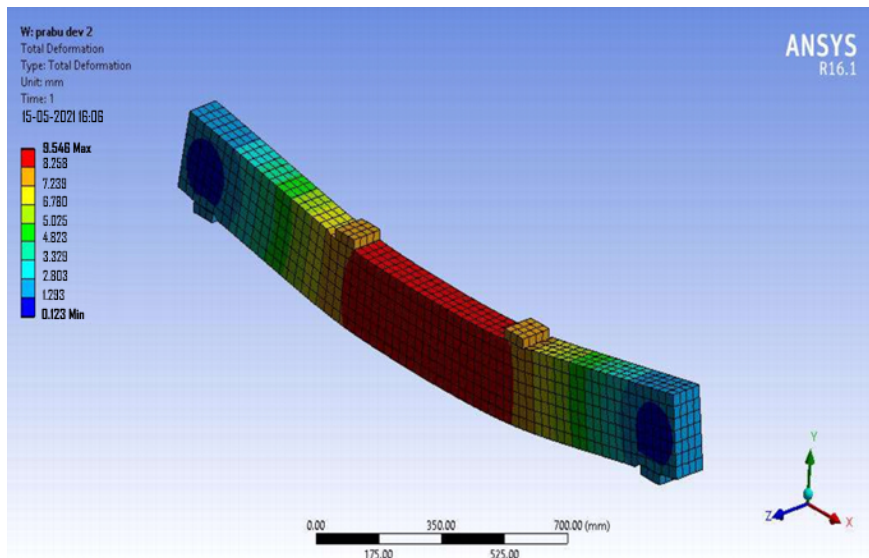


Рис. 6. Деформация балки ГФП-1

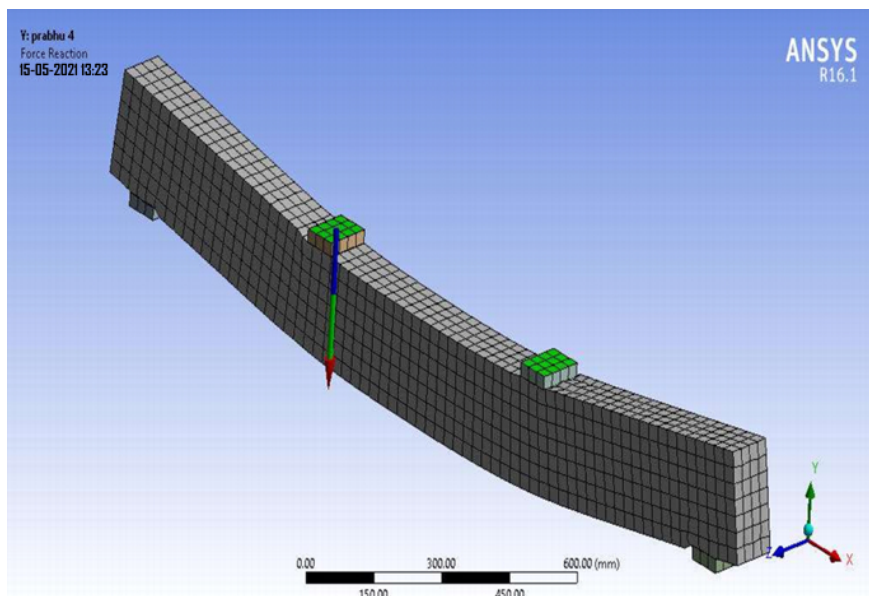


Рис. 7. Прогиб балки ГФП-1

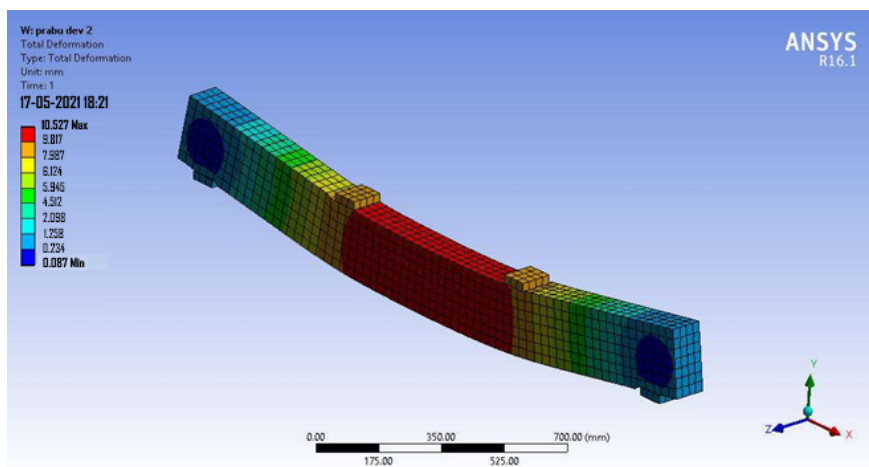


Рис. 8. Деформация балки ГФП-2

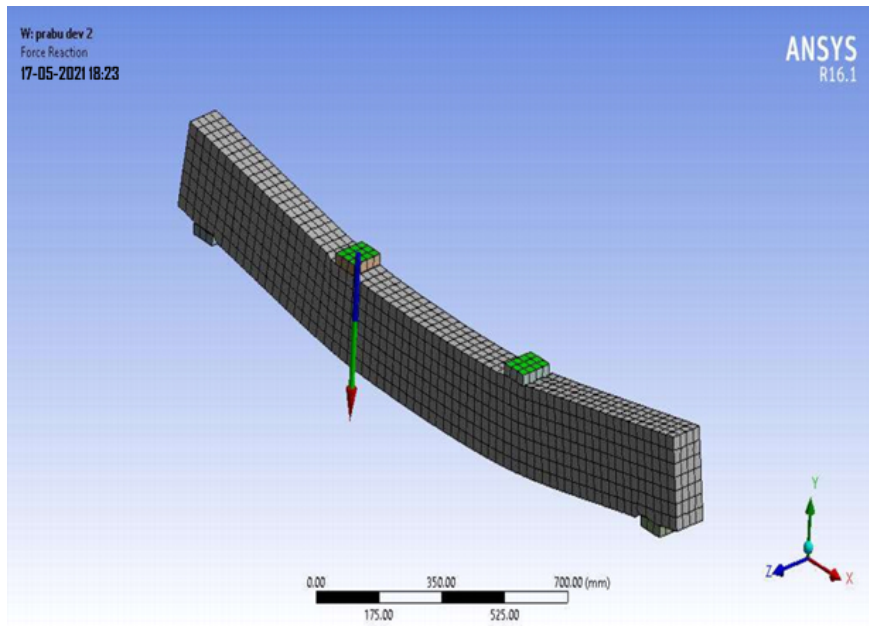


Рис. 9. Прогиб балки ГФП-2

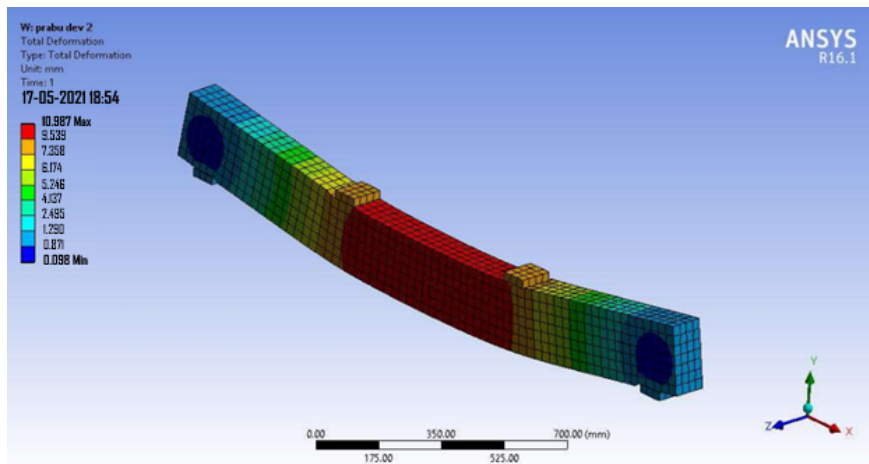


Рис. 10. Деформация балки ГФП-3

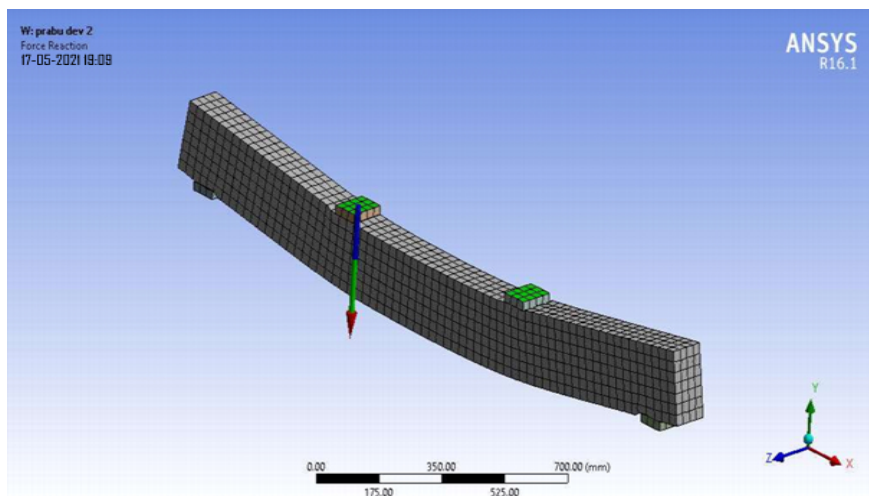


Рис. 11. Прогиб балки ГФП-3

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба приводится в таблицах 4, 5 и на рис. 12–17. Геополимерный бетон — упругопластичный материал, поэтому график «напряжения — деформации» нелинейный.

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба

Нагрузка, кН	Цементобетон			ГП			ФГП-1			ФГП-2			ФГП-3			ФГП-1(1%)		
	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %	Прогиб, мм		Разница, %
	эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.		эксп.	расч.	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,85	0,65	24	0,74	0,58	22	0,48	0,35	27	0,55	0,43	22	0,70	0,42	40	0,64	0,47	27
10	1,72	1,45	16	1,52	1,58	4	1,28	1,14	11	1,28	0,98	23	1,56	0,95	39	1,44	1,05	27
15	2,45	2,35	4	2,35	2,14	9	1,96	1,56	20	1,84	1,14	38	2,18	1,47	33	2,02	1,87	7
20	2,54	3,05	20	2,96	3,05	3	2,38	2,02	15	2,64	1,45	45	2,89	2,04	29	2,74	2,43	12
25	4,35	3,96	9	3,70	3,65	1	2,96	2,48	16	3,04	2,02	34	3,34	2,90	13	3,64	3,05	16
30	5,04	4,57	9	4,20	4,14	1	3,43	3,05	11	3,78	2,75	27	4,10	3,47	15	3,98	3,85	3
35	6,25	5,43	13	4,75	4,56	4	4,14	3,81	8	4,21	3,24	23	4,98	4,25	15	4,64	4,00	14
38	7,12	6,85	4	5,20	5,10	2	4,97	4,26	14	5,02	3,75	25	5,47	5,07	7	5,08	4,56	10
44	–	–	–	5,35	5,15	4	5,14	4,58	11	5,28	4,33	18	6,76	5,48	19	5,38	4,95	8
50	–	–	–	6,75	5,45	19	5,48	4,97	9	5,58	4,98	11	–	–	–	6,57	5,50	16
52	–	–	–	–	–	–	6,03	5,05	16	6,42	5,52	14	–	–	–	–	–	–
63	–	–	–	–	–	–	6,12	5,55	9	–	–	–	–	–	–	–	–	–

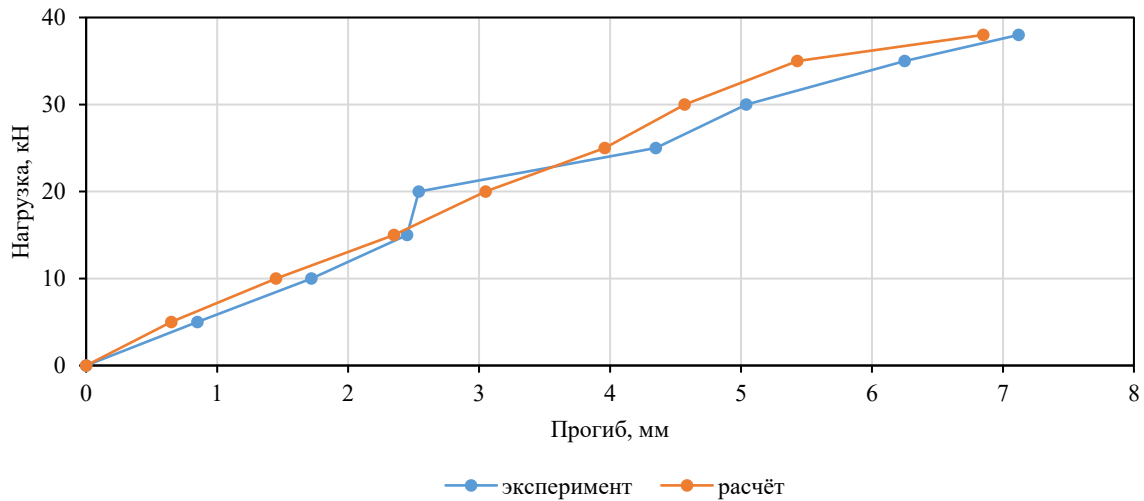


Рис. 12. Прогиб балки из цементобетона

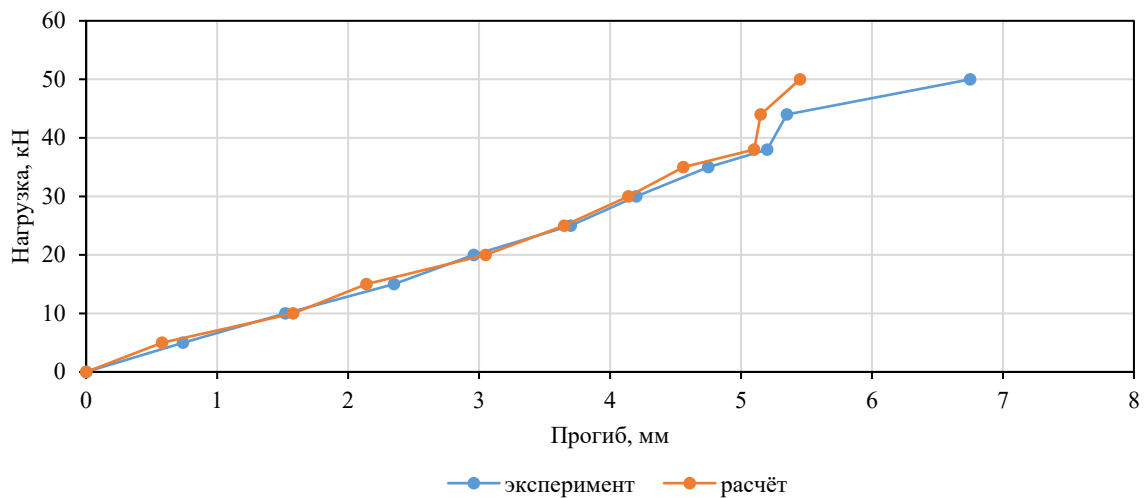


Рис. 13. Прогиб балки ГП

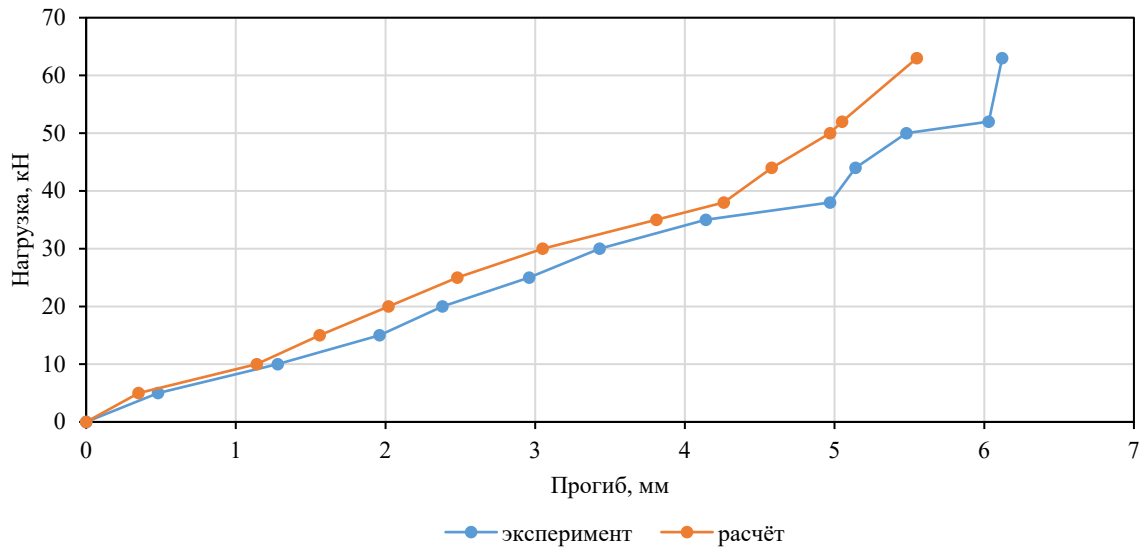


Рис. 14. Прогиб балки ФГП-1

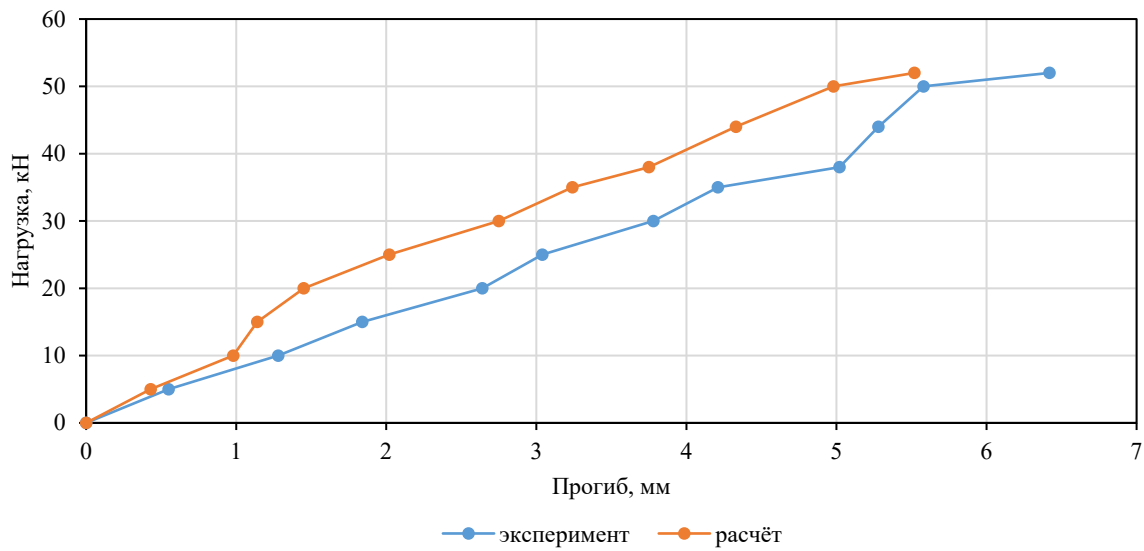


Рис. 15. Прогиб балки ФГП-2

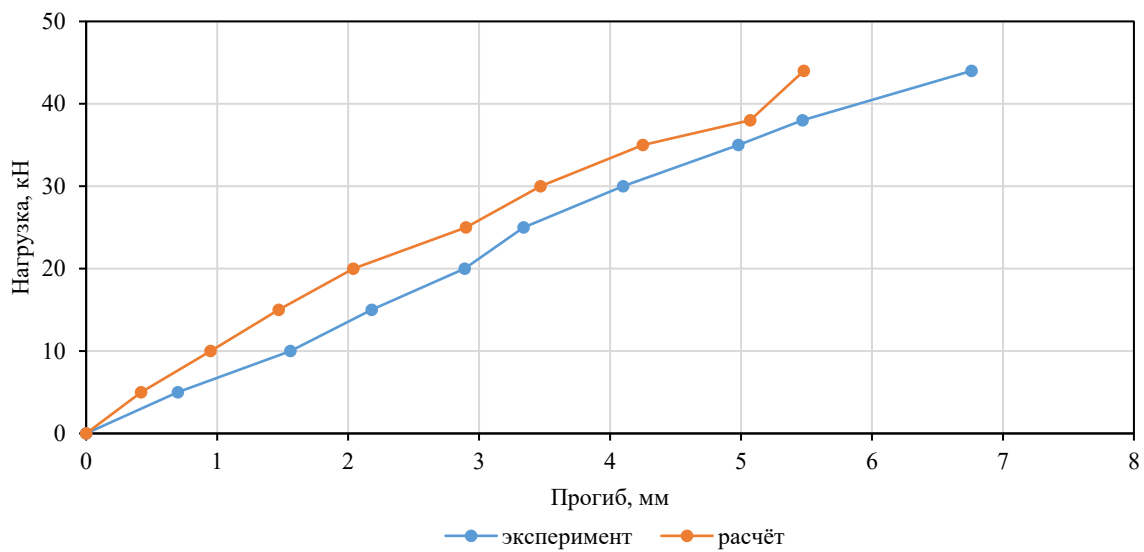


Рис. 16. Прогиб балки ФГП-3

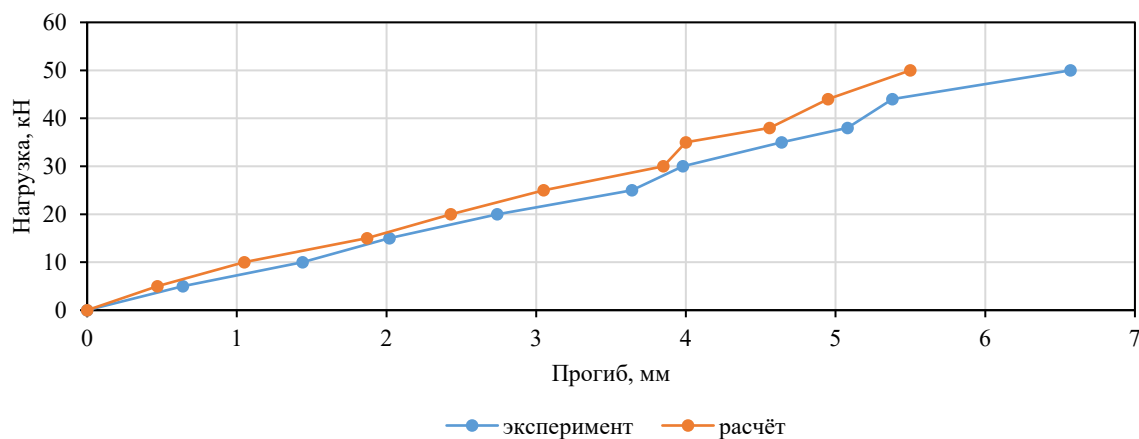


Рис. 17. Прогиб балки ФГП-1 с 1 % фибры из металлокорда

Таблица 5

Сравнение экспериментальных и теоретических результатов прогиба для гибридноармированных фиброгеополимеров

Нагрузка, кН	Прогиб, мм					
	ГФГП-1		ГФГП-2		ГФГП-3	
	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.
0	0	0	0	0	0	0
5	0,26	0,14	0,32	0,18	0,30	0,17
10	0,55	0,37	0,67	0,42	0,58	0,37
15	0,97	0,64	1,18	0,71	1,05	0,82
20	1,28	0,99	1,64	1,07	1,54	1,02
25	1,86	1,14	2,03	1,84	2,07	1,71
30	2,04	1,86	2,85	2,04	2,48	2,10
35	2,74	2,41	3,12	2,26	3,99	2,89
40	3,04	2,74	3,98	3,24	4,29	3,12
45	3,65	3,24	4,26	3,75	4,54	3,92
50	3,98	3,74	5,24	4,36	4,96	4,26
55	4,18	4,08	6,05	5,05	5,02	4,98
63	4,86	4,66	6,14	5,58	5,64	5,21
64	5,26	4,89	–	–	6,03	5,74
70	5,77	5,14	–	–	–	–
72	5,96	5,85	–	–	–	–

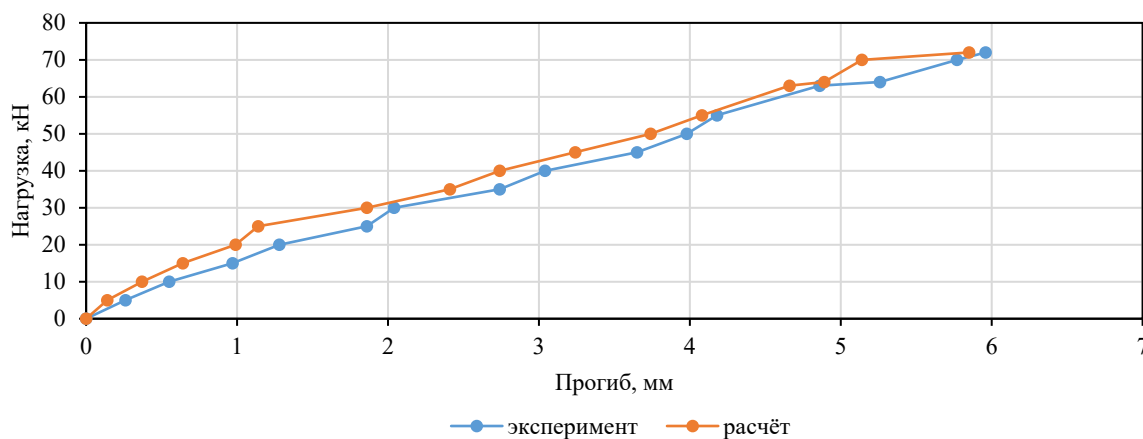


Рис. 18. Прогиб балки ГФГП-1

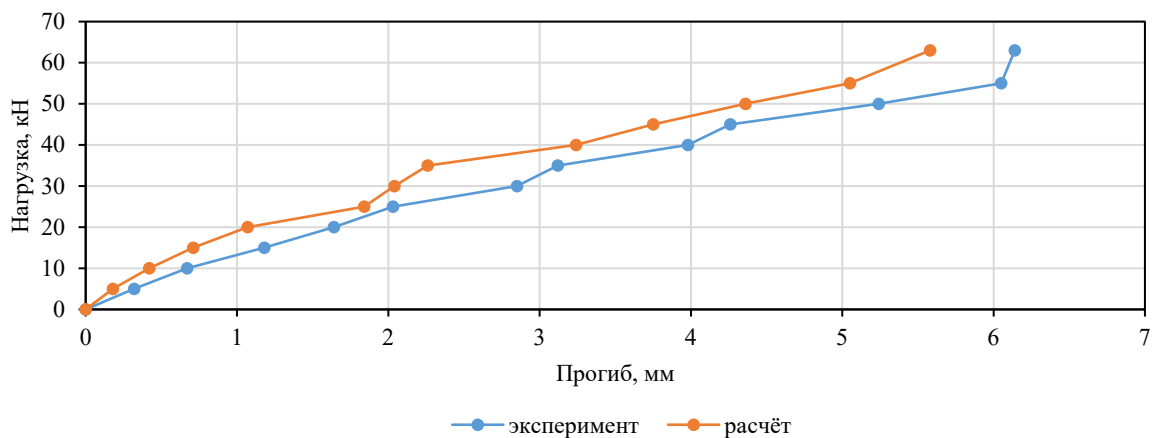


Рис. 19. Прогиб балки ГФГП-2

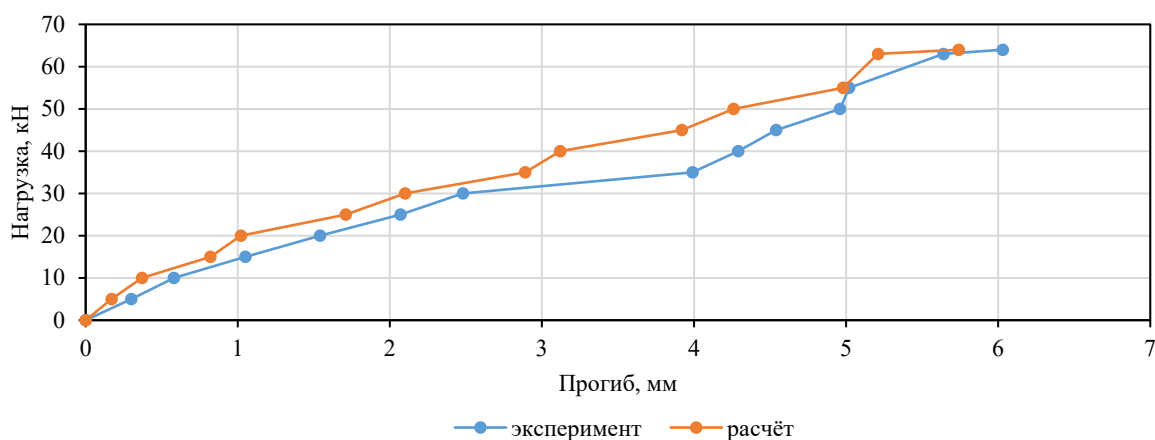


Рис. 20. Прогиб балки ГФГП-3

Таким образом, моделирование методом конечных элементов балок из моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров показало хорошую сходимость экспериментальных и теоретических результатов, что позволяет эффективно проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики.

**Обсуждение.** Самое заметное расхождение между итогами опытов и расчетов (45 %) выявлено для ФГП-2 при нагрузке 20 кН. При 15 кН обнаруженная разница — 38 %. Однако в этом и следующих случаях важно подчеркнуть невысокие абсолютные показатели. При 20 кН теоретически предполагался прогиб 1,45 мм, эксперимент показал 2,64 мм. Соответствующие данные при 15 кН — 1,14 и 1,84. При других нагрузках разница существенно меньше. Для ФГП-3 максимальное расхождение фиксируется на минимальных нагрузках: 40 % при 5 кН и 39 % при 10 кН. Если речь об абсолютных цифрах, то в первом случае расчет — 0,42 мм, эксперимент — 0,70 мм. Во втором случае — 0,95 мм и 1,56 мм соответственно. Для ФГП-1 и ФГП-1 (1 %) максимальное расхождение не превысило 27 %, причем при малых нагрузках. При нагрузках 5 кН теоретически полученный показатель прогиба по ФГП-1 — 0,35 мм, установленный опытным путем — 0,48 мм. Разница — 27 %. При нагрузке 5 кН для ФГП-1 (1 %) расчет показал прогиб 0,47 мм, эксперимент — 0,64 мм. Соответствующие данные для 10 кН — 1,05 и 1,44. Разница в обоих случаях — 27 %. Для других нагрузок — существенно меньше.

Отметим также случаи наилучшей сходимости данных расчетов и опытов. Для ФГП-1 это 8 % (нагрузка — 35 кН), для ФГП-2 — 11 % (50 кН), для ФГП-3 — 7 % (38 кН), для ФГП-1 (1 %) — 3 % (30 кН).

Результаты исследования гибридноармированных фиброгеополимеров позволяют утверждать, что самое значимое расхождение теории и экспериментов фиксируется при минимальных нагрузках (в данном случае — 5 кН). Так, для ФГП-1 это 46,2 % (расчет показал прогиб 0,14 мм, опыт — 0,26 мм). Соответствующая разница для ФГП-2 — 43,8 % (0,18 мм и 0,32 мм), для ФГП-3 — 43,3 % (0,17 и 0,30). При других нагрузках расхождения меньше.

Лучшее соответствие расчетов и итогов опытов для ФГП-1 — 1,85 %. Такой показатель зафиксировали при нагрузке 72 кН (теория — 5,85 мм, эксперимент — 5,96 мм). Наименьшее расхождение, полученное при моделировании прогиба для ФГП-2, — 9,12 % (63 кН, соответственно 5,58 мм и 6,14 мм). Для ФГП-3 — 0,80 % (55 кН, 4,98 мм и 5,02 мм). Как отмечалось выше, следует принимать во внимание крайне незначительные расхождения в абсолютных цифрах. И частные, и обобщенные данные представляют интерес для проектной и инженерной практики. Это подтверждает визуализация результатов работы — кривые на рис. 12–20 во многих случаях схожи или совпадают.

**Заключение.** Получены инновационные компоненты для производства экологически безопасных строительных материалов [17]. Экологичность обусловлена тем, что используется альтернатива цементу [18], и это обеспечивает значительное снижение выбросов парниковых газов. Проектирование гибридноармированных фиброгеополимеров дает возможность получить высокие значения прочности — как при сжатии (от 46 МПа), так и при изгибе (от 10 МПа). При использовании гибридной фибры возможно достичь прочности при изгибе и сжатии на уровне 1:4, и это в несколько раз выше, чем для неармированных портландцементных бетонов [19]. Модуль упругости более 25 ГПа показывает хорошее сопротивление материала деформациям, что положительно влияет на прочность и устойчивость строительных конструкций [20]. Анализ гибридноармированных фиброгеополимерных балок методом конечных элементов подтвердил полученные экспериментальные результаты [21].

Ниже описаны три основных результата научной работы.

1. Получены два вида геополимеров:

– моноармированные (фибра из металлокорда, полипропиленовая фибра и фибра из отходов производства базальтовой ваты — ТВМ);

– гибриднофиброармированные (металлокорд + полипропилен, металлокорд + ТВМ, полипропилен + ТВМ).

2. Фиброармированные геополимербетонные смеси обладают нормативными характеристиками удобоукладываемости, позволяющими эффективно транспортировать их к месту применения и укладывать в опалубку.

3. Моделирование методом конечных компонентов балок из моноармированных и гибридноармированных фиброгеополимеров показало хорошую сходимость экспериментальных и теоретических результатов, что позволяет эффективно проектировать конструкции из разработанных материалов и прогнозировать их эксплуатационные характеристики [22].

#### Список литературы / References

1. Laihao Yu, Yingyi Zhang, Zhenghao Zhang, Jialong Yang. Conversion of Recycled Sludge Waste into High Value-Added Ceramics as Engineering Construction Materials: Fabrication, Characterization and Performance Evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 2023;475:146509. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146509>
2. Klyuev AV, Kashapov NF, Klyuev SV, Zolotareva SV, Shchekina NA, Shorstova ES, et al. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component. *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-5-18>
3. Fediuk R, Amran M, Klyuev S, Klyuev A. Increasing the Performance of a Fiber-Reinforced Concrete for Protective Facilities. *Fibers*. 2021;9(11):64. <https://doi.org/10.3390/fib9110064>
4. Bespolitov DV, Konovalova NA, Pankov PP, Shavanov ND. Overburden Recycling in Manufacture of Composite Materials for Road Construction at Mines. *Journal of Mining Science*. 2023;59(1):167–175. <https://doi.org/10.1134/S1062739123010180>
5. Klyuev S, Klyuev A, Fediuk R, Ageeva M, Fomina E, Amran M, et al. Fresh and Mechanical Properties of Low-Cement Mortars for 3D Printing. *Construction and Building Materials*. 2022;338:127644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127644>
6. Volokitina I, Kolesnikov A, Fediuk R, Klyuev S, Sabitov L, Volokitin A, et al. Study of the Properties of Antifriction Rings under Severe Plastic Deformation. *Materials*. 2022;15(7):2584. <https://doi.org/10.3390/ma15072584>
7. Gilbert Sebastiano Gondokusumo, Akshay Venkateshwaran, Kiang Hwee Tan, GY Richard Liew. Shear Strength and Ductility of Novel Steel Fibre-Reinforced Concrete Dowel Connections for Composite Beams. *Construction and Building Materials*. 2024;447:138159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138159>
8. Wenjie Ge, Feng Zhang, Yi Wang, Ashraf Ashour, Laiyong Luo, Linfeng Qiu, et al. Machine Learning Predictions for Bending Capacity of ECC-Concrete Composite Beams Hybrid Reinforced with Steel and FRP Bars. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03670. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03670>
9. Klyuev AV, Kashapov NF, Klyuev SV, Lesovik RV, Ageeva MS, Fomina EV, et al. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials. *Construction Materials and Products*. 2023;6(1):60–73. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-1-60-73>
10. Qi Chen, Xiaoyong Luo, Wangcheng Luo, Zheng Yang, Dan Yang, Xutong Zheng, et al. Seismic Performance of Innovative Precast Concrete Composite Walls with Embedded XPS Insulation Layer. *Engineering Structures*. 2024;316:118605. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118605>
11. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AS, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method). *Construction Materials and Products*. 2023;6(3):5–17. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-3-5-17>
12. Novoselov OG, Sabitov LS, Sibgatullin KE, Sibgatullin ES, Klyuev AS, Klyuev SV, et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface). *Construction Materials and Products*. 2023;6(2):104–120. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-2-104-120>

13. Edlaine Feital Barbosa Motta, Aldo Ribeiro de Carvalho, Júlia Gargiulo Duarte Barra, Indhira Oliveira Maciel, Thaís Mayra de Oliveira. Thermomechanical Behavior of Concretes with Addition of Non-Functionalized and Functionalized Carbon Nanotubes. *Journal of Building Engineering*. 2024;96:110642. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110642>
14. Yuqiang Lin, Wenyong Zheng, Shuhua Liu, Min Yuan, Xi Qin. Multi-Ion Erosion Test and Molecular Dynamics Simulation of Carbon Nanotube Concrete under Stray Current and Salt Brine Environment. *Developments in the Built Environment*. 2024;17:100335. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100335>
15. Ige Samuel Ayeni, Nor Hasanah Abdul Shukur Lim, Mostafa Samad. Engineering Properties of Natural Fibre-Reinforced One-Part Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*. 2024;456:139161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139161>
16. Sarici T, Ozcan M. Using Geopolymer Coated and Uncoated Geotextile as a Hybrid Method to Improve Uplift Capacity of Screw Piles in Cohesionless Soil. *Alexandria Engineering Journal*. 2024;105:666–681. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.08.042>
17. Kachurin NM, Stas GV, Prokhorov DO, Gavrina OA. Selection of Technologies and Directions for Reducing the Technogenic Impact of Mineral Formations on the Environment. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):283–291. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-283-291>
18. Zaalishvili VB, Kambolov DA, Melkov DA, Fidarova MI. Statistical Characteristics Calculation of Seismic Intensity Increments for the Purpose of Seismic Microzoning in Mountain Territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(1):345–357. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-1-345-357>
19. Kachurin NM, Prokhorov DO, Stas GV, Gavrina OA. Justification of Technology for Anthropogenic Deposits Development. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):833–841. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-833-841>
20. Tyulyaeva Yu, Khayrutdinov A, Galachieva I, Totrukova I. Creation of a High-Strength Backfill Composite Based on Sulfide-Bearing Technogenic Waste from Mining Production. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):1384–1396. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1384-1396>
21. Yazyev SB, Chepurmenko AS. Buckling of Rectangular Plates under Nonlinear Creep. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):257–268. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-257-268>
22. Kondratieva TN, Chepurmenko AS. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>

**Об авторах:**

**Сергей Васильевич Клюев**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru)

**Александр Васильевич Клюев**, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Научно-исследовательской лаборатории ресурсо-энергосберегающих технологий, оборудования и комплексов Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [klyuyevav@yandex.ru](mailto:klyuyevav@yandex.ru)

**Нарман Любович Любов**, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364906, Российская Федерация, г. Грозный, Старопромысловское шоссе, 21 а), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [yrekly@mail.ru](mailto:yrekly@mail.ru)

**Роман Сергеевич Федюк**, доктор технических наук, профессор военного учебного центра при Дальневосточном федеральном университете (690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru)

**Елена Владимировна Левкина**, кандидат экономических наук, доцент, начальник отдела по работе с диссертационными советами Дальневосточного федерального университета (690922, Российская Федерация, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [levkina.ev@dvfu.ru](mailto:levkina.ev@dvfu.ru)

**Заявленный вклад авторов:**

**С.В. Клюев:** разработка концепции, написание черновика рукописи.

**А.В. Клюев:** курирование данных, написание черновика рукописи.

**Н.А. Любов:** формальный анализ, написание черновика рукописи.

**Р.С. Федюк:** проведение исследования, написание черновика рукописи.

**Е.В. Левкина:** разработка методологии, написание черновика рукописи.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**

***About the Authors:***

**Sergey V. Klyuev**, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Leading Researcher of the Scientific Research Laboratory of Resource and Energy-Saving Technologies, Equipment and Complexes, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukov Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [klyuyev@yandex.ru](mailto:klyuyev@yandex.ru)

**Alexander V. Klyuev**, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Research Laboratory of Resource and Energy-Saving Technologies, Equipment and Complexes, V.G. Shukhov Belgorod State Technological University (46, Kostyukov Str., Belgorod, 308012, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [klyuyevav@yandex.ru](mailto:klyuyevav@yandex.ru)

**Narman A. Ayubov**, Cand.Sci. (Economics), Senior Researcher of the Kh.I. Ibragimov Complex Research Institute, Russian Academy of Sciences (21a, Staropromyslovskoe shosse, Grozny, 364906, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [yrekly@mail.ru](mailto:yrekly@mail.ru)

**Roman S. Fediuk**, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Military Training Center, Far Eastern Federal University (10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), [roman44@yandex.ru](mailto:roman44@yandex.ru)

**Elena V. Levkina**, Cand.Sci. (Economics), Associated Professor, Head of the Department for Work with Dissertation Councils, Far Eastern Federal University (10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [levkina.ev@dvfu.ru](mailto:levkina.ev@dvfu.ru)

***Claimed Contributorship:***

**SV Klyuev:** conceptualization, writing – original draft preparation.

**AV Klyuev:** data curation, writing – original draft preparation.

**NA Ayubov:** formal analysis, writing – original draft preparation.

**RS Fediuk:** investigation, writing – original draft preparation.

**EV Levkina:** methodology, writing – original draft preparation.

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final version of manuscript.***

**Поступила в редакцию / Received** 20.06.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 15.07.2025

**Принята к публикации / Accepted** 28.07.2025