

И.В. БАКЛЫКОВАО «Институт Гидропроект», Волоколамское шоссе, д. 2, г. Москва, 125993,
Российская Федерация

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО УСИЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация

Введение. В ходе исследования выполнено расчетное обоснование прочности железобетонной балки, усиленной композитными материалами. На первом этапе разработана упругая конечно-элементная модель для анализа распределения напряжений и расчета необходимой площади армирования. На втором этапе включена нелинейная деформационная модель бетона, учтен процесс трещинообразования. Итерационные расчеты показали достижение предельного состояния конструкции. На третьем этапе была создана модель с внешним композитным армированием. Усиление уменьшило прогиб с 7,36 до 6,47 мм, снизило напряжения в арматуре на 17,46 % и увеличило несущую способность на 32 %. Планируются экспериментальные исследования, включая учет динамических воздействий и температурно-влажностных факторов.

Цель. Исследование эффективности применения композитных материалов на основе полимеров, армированных волокнами, для усиления железобетонных конструкций; сравнение напряженно-деформированного состояния усиленной и неусиленной конструкций.

Материалы и методы. Расчетные исследования железобетонных конструкций выполнялись методом конечных элементов на основе нелинейных моделей в программном комплексе ANSYS.

Результаты. Результатом работы стал анализ напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции с внешним композитным армированием и без него, оценивший эффективность усиления в повышении прочности и долговечности. Основная задача – моделирование и анализ таких конструкций, включая влияние композитов на снижение напряже-

ний, уменьшение прогибов и увеличение несущей способности.

Выводы. Результаты показали, что применение композитных материалов для внешнего армирования железобетонных конструкций эффективно снижает напряжения в арматуре, уменьшает прогиб и предотвращает образование трещин под композитным покрытием. Максимальные растягивающие напряжения в арматуре снизились на 17,46 %, а несущая способность конструкции увеличилась на 32 % (с 126,75 до 167,31 кН).

Ключевые слова: железобетонные конструкции, расчетные исследования, напряженно-деформированное состояние, усиление конструкции, система внешнего армирования, композитный материал, нелинейный бетон, трещинообразование, гидротехническое сооружение

Для цитирования: Баклыков И.В. Результаты расчетных исследований железобетонных конструкций с использованием системы внешнего усиления на основе композитных материалов // *Бетон и железобетон*. 2024. № 5 (624). С. 22–32. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.11.2024

Поступила после рецензирования 01.12.2024

Принята к публикации 05.12.2024

RESULTS OF COMPUTATIONAL STUDIES OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING AN EXTERNAL REINFORCEMENT SYSTEM BASED ON COMPOSITE MATERIALS

Abstract

Introduction. In the course of the study, a calculated justification of the strength of a reinforced concrete beam reinforced with composite materials was performed. At the first stage, an elastic finite element model was developed to analyze the stress distribution and calculate the required reinforcement area. At the second stage, a nonlinear deformation model of concrete is included, the cracking process is taken into account. Iterative calculations have shown the achievement of the limiting state of the structure. At the third stage, a model with external composite reinforcement was created. The reinforcement reduced the deflection from 7.36 to 6.47 mm, reduced the stresses in the reinforcement by 17.46 % and increased the bearing capacity by 32 %. Experimental studies are planned, including consideration of dynamic effects and temperature and humidity factors.

Aim. The main aim of this study is to investigate the effectiveness of fiber-reinforced polymer-based composite materials for reinforced concrete structures strengthening. The stress-strain states of reinforced and unreinforced structures were also compared.

Materials and methods. Computational studies of reinforced concrete structures were performed using the finite element method with nonlinear models in the ANSYS software package.

Results. The analysis of the stress-strain state of the reinforced concrete structure with and without external composite reinforcement was carried out, allowing for an assessment of the effectiveness of composite reinforcement for improving the strength and durability of the structure. The study models and analyzes the stress-strain state of such structures when using external reinforcement and evaluates the impact of composite mate-

rials on stress and deflection reducing, and load-bearing capacity of the structure increasing.

Conclusions. The study results indicate that using of composite materials for external reinforcement of reinforced concrete structures effectively reduces reinforcement stresses, decreases deflection, and prevents crack formation under composite covering. Maximum tensile stresses in the reinforcement were reduced by 17.46 %, and the load-bearing capacity of the structure increased by 32 % (from 126.75 to 167.31 kN).

Keywords: reinforced concrete structures, computational studies, stress-strain state, structural reinforcement, external reinforcement system, composite material, nonlinear deformation of concrete, crack formation, hydraulic structure

For citation: Baklykov I.V. Results of computational studies of reinforced concrete structures using an external reinforcement system based on composite materials. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2024, no. 5 (624), pp. 22–32. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5\(624\)-22-32](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-5(624)-22-32). EDN: QQKAJH

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 01.11.2024

Revised 01.12.2024

Accepted 05.12.2024

Введение

Благодаря своим отличным свойствам и высоким показателям надежности [1, 2] использование композитов на основе полимеров, армированных волокнами, для ремонта и усиления конструкций значительно увеличилось [3–5]. В настоящее время системы внешнего армирования находят широкое

применение для усиления конструкций гидротехнических сооружений [6–12].

Для моделирования разрушения бетона использована трехмерная модель Menetrey–Willam [13], представляющая собой трехпараметрическую поверхность разрушения, описываемую следующим выражением:

$$f(\xi, \rho, \theta) = \left[\sqrt{1,5} \times \frac{\rho}{f'_c} \right]^2 + m \times \left[\frac{\rho}{\sqrt{6} \times f'_c} \times r(\theta, e) + \frac{\xi}{\sqrt{3} \times f'_c} \right] - c = 0, \tag{1}$$

где

$$r(\theta, e) = \frac{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2\theta + (2 \times e - 1)^2}{2 \times (1 - e^2) \times \cos\theta + (2 \times e - 1) \times \sqrt{4 \times (1 - e^2) \times \cos^2\theta + 5 \times e^2 - 4 \times e}} \tag{2}$$

$$m = 3 \times \frac{f'_c{}^2 - f'_t{}^2}{f'_c \times f'_t} \times \frac{e}{e + 1}. \tag{3}$$

Уравнение (1) выражается с помощью трех инвариантов напряжений, известных как координаты Haigh–Westergaard; m – параметр трения материала, зависящий от прочности на одноосное сжатие f'_c , от прочности на одноосное растяжение f'_t , а также от параметра эксцентриситета e . Эксцентриситет e определяет гладкость поверхности Menetrey–Willam, и его значение влияет на описание разрушения либо при двухосном растяжении, либо при сжатии. В (1) ξ – инвариант гидростатического напряжения, ρ – инвариант девиаторного напряжения, θ – девиаторный полярный угол Лоде; координаты Haigh–Westergaard (H–W) записываются как:

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} \times I_1, \quad I_1 = \sigma_{ii}, \tag{4}$$

$$\rho = \sqrt{2 \times J_2}, \quad J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \tag{5}$$

$$\cos 3\theta = \frac{3 \times \sqrt{3}}{2} \times \frac{J_3}{J_3^{3/2}}, \quad J_3 = \frac{1}{3} s_{ij} s_{ik} s_{ki}, \tag{6}$$

где s_{ij} обозначает компоненты девиаторного напряжения, т. е. $s_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3 \sigma_{kk} \delta_{ij}$, δ_{ij} является символом Кронекера. Следует отметить, что при $0 \leq \theta \leq \pi/3$ выполняются следующие соотношения между главными напряжениями σ_{ij} и координатами H–W:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{Bmatrix} \xi \\ \xi \\ \xi \end{Bmatrix} + \sqrt{\frac{2}{3}} \times \rho \begin{Bmatrix} \cos\theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2 \times \pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2 \times \pi}{3}\right) \end{Bmatrix}. \tag{7}$$

Поверхность, представленная формулой (1), определена для $0 \leq \theta \leq \pi/3$, поэтому простирается во все полярные направления $0 \leq \theta \leq 2\pi$, используя тройную симметрию.

Для арматуры и композитного материала принято линейное деформирование.

Цель

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции, сравнительный анализ аналитических методов расчета железобетонных конструкций и метода конечных элементов, а также оценка влияния применения композитных материалов на повышение несущей способности конструкции.

Материалы и методы

В работе применяются аналитические методы расчета и метод конечных элементов для исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций.

Результаты

В данной работе проведено исследование железобетонной конструкции, работающей в условиях изгибающих нагрузок. Для этого была разработана и представлена общая пространственная модель конструкции, которая демонстрируется на рис. 1, и арматурный каркас (рис. 2). Модель учитывает основные особенности конструкции и позволяет проанализировать ее поведение под воздействием изгибающих моментов, а также оценить напряженно-деформированное состояние элементов при усилении композитным материалом.

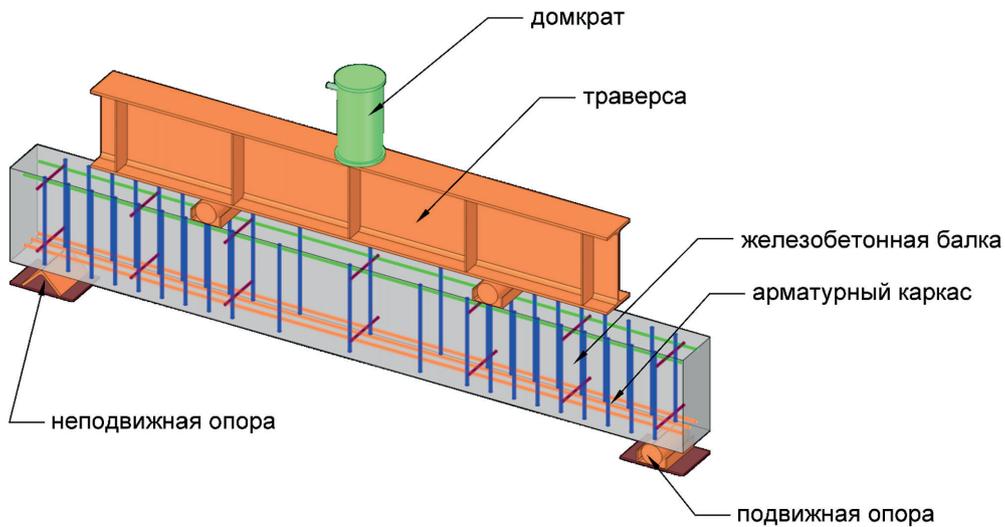


Рис. 1. Общая модель железобетонной конструкции
Fig. 1. General model of reinforced concrete structure

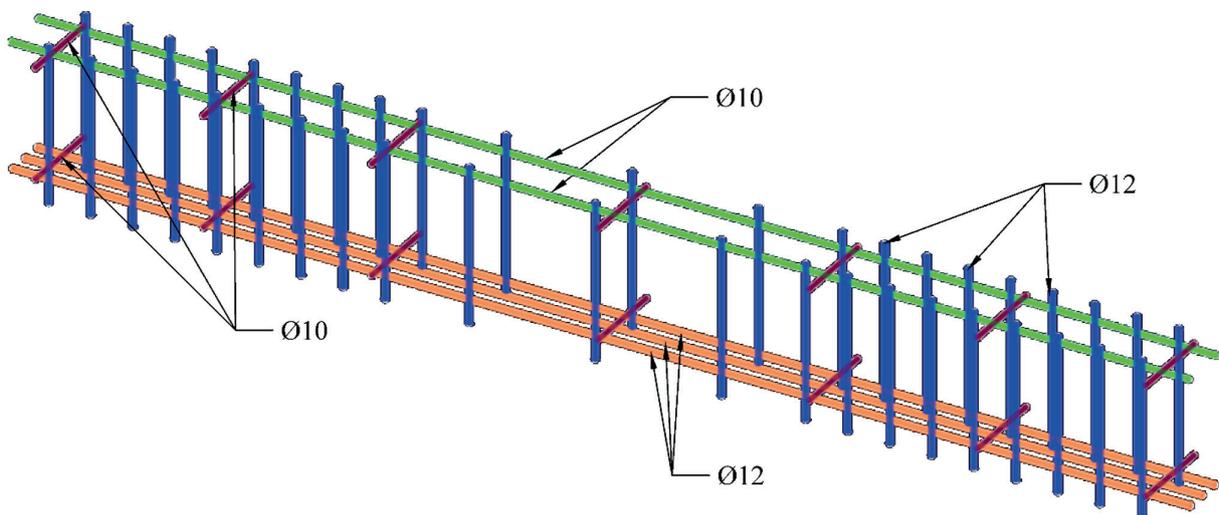


Рис. 2. Общий вид арматурного каркаса железобетонной конструкции
Fig. 2. General view of the reinforcement framework of reinforced concrete construction

$L = 2,15$ м – длина балки.
 $h = 0,30$ м – высота балки.
 $b = 0,15$ м – ширина балки.

В качестве бетона был принят тяжелый бетон класса В25 ($R_{bn} = 18,50$ МПа, $R_{bfn} = 1,55$ МПа, $R_b = 14,50$ МПа, $R_{bt} = 1,05$ МПа, $E_b = 30\,000$ МПа).

Арматура класса А500С ($R_{s,n} = 500$ МПа, $R_s = 450$ МПа, $E_s = 200\,000$ МПа).

Композитный материал типа CarbonWrap Tape ($R_{f,n} = 3600$ МПа, $R_f = 2400$ МПа, $E_f = 230\,000$ МПа).

Диаграммы деформирования бетона и арматуры представлены на рис. 3.

Расчетная схема приложения нагрузки представлена на рис. 4.

Суммарная расчетная сила $P = 2 \times N = 450$ кН.

На первом этапе необходимо проверить прочность конструкции и определить армирование.

Расчетный момент от действия собственного веса бетона составляет:

$$M_{с.в.} = 477,680 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 0,48 \text{ кН} \times \text{м}.$$

Расчетный момент от сосредоточенных сил в центре пролета:

$$\begin{aligned} M_F &= N \times a = 63\,380 \frac{\text{кг} \times \text{м}}{\text{с}^2} \times 0,525 \text{ м} = \\ &= 33\,274,50 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33,27 \text{ кН} \times \text{м}. \end{aligned}$$

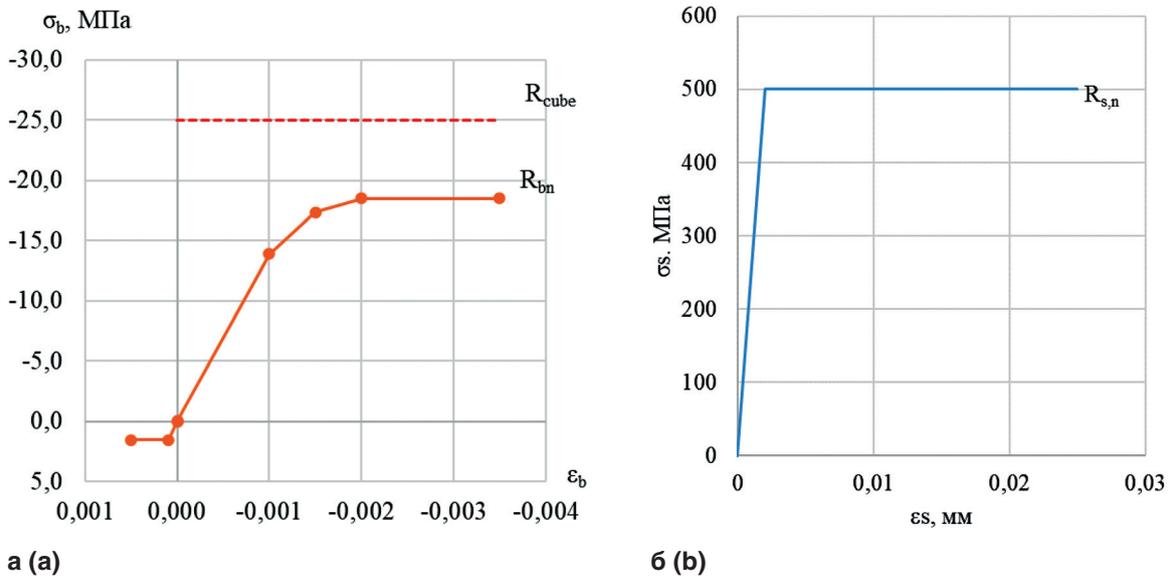


Рис. 3. Расчетные диаграммы деформирования: а – бетона класса В25; б – арматуры А500С
Fig. 3. Calculated deformation diagrams: а – concrete of В25 class; б – А500С reinforcement

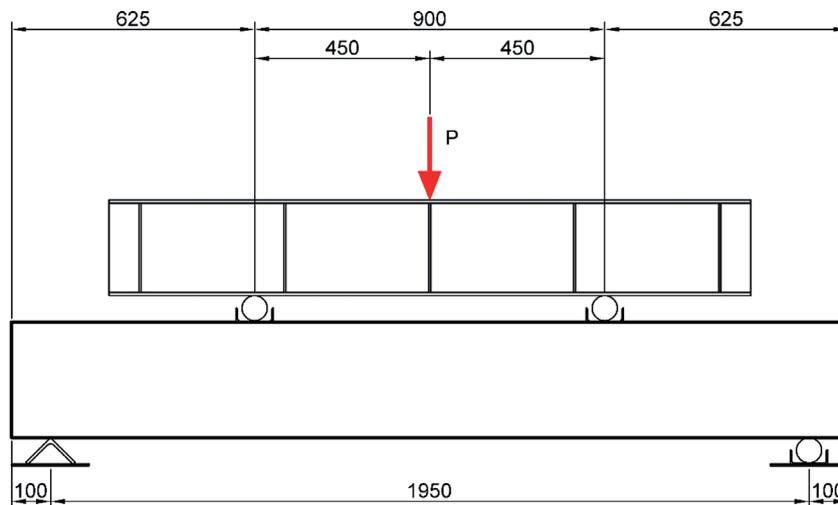


Рис. 4. Расчетная схема
Fig. 4. Calculation scheme

Суммарный момент в центре пролета от действия собственного веса и сосредоточенных сил:

$$M_A = M_{c.b.} + M_F = 477,68 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} + 33\,274,50 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33\,752,18 \frac{\text{кг} \times \text{м}^2}{\text{с}^2} = 33,75 \text{ кН} \times \text{м}.$$

По полученному моменту M_A определим армирование при всех коэффициентах (γ_{lc} , γ_n , γ_c , γ_b , γ_s), равных 1,0, как для чистого изгиба.

$$h_0 = h - a = 0,300 \text{ м} - 0,064 \text{ м} = 0,260 \text{ м},$$

$$x = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \times \gamma_{lc} \times \gamma_n \times M}{\gamma_c \times \gamma_b \times R_b \times b}} = h_0 - \sqrt{h_0^2 - \frac{2 \times M}{R_b \times b}} = 0,26 - \sqrt{0,26^2 - \frac{2 \times 33\,752,18}{14\,500\,000 \times 0,15}} = 0,069 \text{ м} = 69 \text{ мм}.$$

При $x = 0,069 < 2a' = 0,08$,

$$A_s = \frac{\gamma_b \times R_b \times b \times x}{\gamma_s \times R_s} = \frac{R_b \times b \times x}{R_s} = \frac{14\,500\,000 \times 0,15 \times 0,069}{450\,000\,000} = 0,0003324 \text{ м}^2 = 3,324 \text{ см}^2.$$

Требуемая площадь армирования $A_s = 3,324 \text{ см}^2$ соответствует стержням армирования 3 Ø 12 с фактической площадью $A_{s,ф} = 3,390 \text{ см}^2$.

Для определения необходимого армирования и проверки прочности конструкции были выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния (рис. 5) с учетом упругой работы материалов. В результате данных расчетов был получен изгибающий момент M , на основе которого определена требуемая площадь армирования A_s . Проведение расчетов позволило определить оптимальное количество арматуры для обеспечения необходимой прочности конструкции при заданных нагрузках.

Интегрируя горизонтальные напряжения по высоте в центре пролета, получаем значение изгибающего момента $M = 33,75 \text{ кН} \times \text{м}$. На основе данного момента и с использованием формул для изгиба была рассчитана требуемая площадь армирования в пролете, со-

ставившая $A_{s,МКЭ} = 3,32 \text{ см}^2$, что хорошо коррелирует с аналитическим решением $A_s = 3,324 \text{ см}^2$.

На следующем этапе был проведен проверочный расчет железобетонной конструкции с учетом образования трещин в бетоне и определением напряжений в арматуре. Такой подход позволяет точнее оценить поведение конструкции при повышенных нагрузках, обеспечивая расчет необходимых параметров армирования для обеспечения долговечности и прочности конструкции в предельном состоянии.

Как видно из рис. 6, максимальный прогиб конструкции составил 7,36 мм, что находится в пределах допустимых значений. Для данной конструкции предельное значение прогиба составляет $l/150 = 2150/150 = 14,33 \text{ мм}$. Таким образом, фактический прогиб менее чем в два раза ниже допустимого, что свидетельствует о надежности и прочности конструкции при заданной нагрузке.

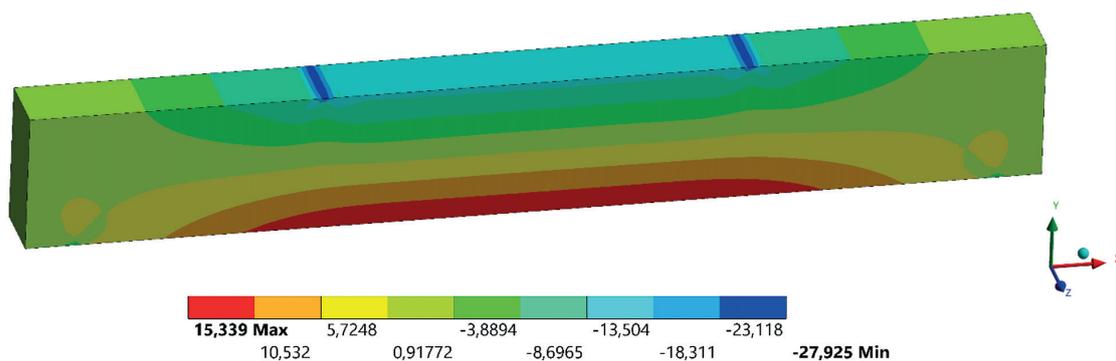


Рис. 5. Этап 1. Горизонтальные напряжения, МПа
Fig. 5. Stage 1. Horizontal stresses, MPa

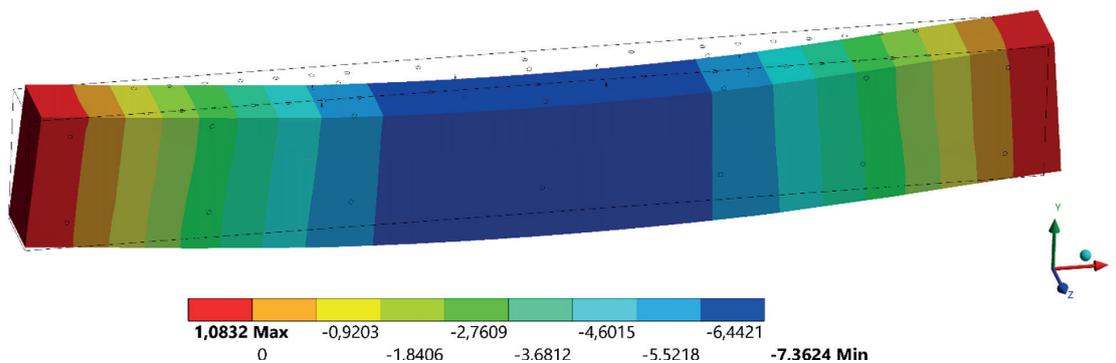


Рис. 6. Этап 2. Расчетные прогибы железобетонной конструкции, мм
Fig. 6. Stage 2. Calculated deflections of reinforced concrete structure, mm

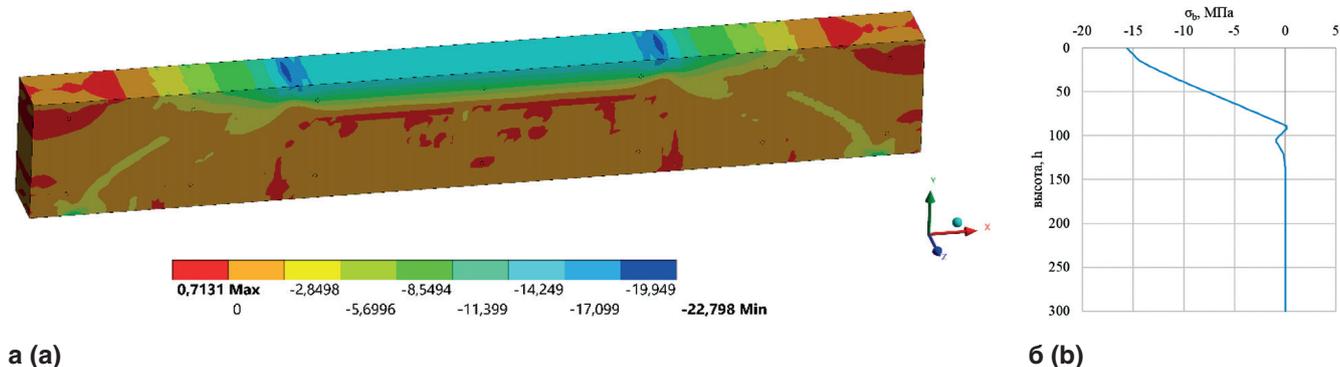


Рис. 7. Этап 2. Горизонтальные напряжения в бетоне, МПа:
 а – результаты НДС; б – эпюра сжимающих напряжений по высоте, МПа
Fig. 7. Stage 2. Horizontal stresses in concrete, MPa: a – stress-strain state results; b – plot of compressive stresses in height, MPa

Из рис. 7 видно, что сжимающие напряжения в бетоне в пролетной части конструкции достигли значения -14,49 МПа, что не превышает предельное сопротивление бетона сжатию, равное $R_b = 14,50$ МПа. В нижней растянутой зоне конструкции напряжения значительно снизились из-за появления трещин и стали близки к предельному сопротивлению бетона на растяжение $R_{bt} = 1,05$ МПа. Это свидетельствует о том, что конструкция остается в допустимых пределах по прочности при приложенной нагрузке, несмотря на возникновение трещин в растянутой зоне.

Из рис. 8 видно, что напряжения в нижней растянутой арматуре составили 432,75 МПа, что находится вблизи предельного сопротивления арматуры, равного $R_s = 435$ МПа. Это указывает на то, что арматура почти достигла предела прочности, обеспечивая эффективное восприятие растягивающих нагрузок, приложенных к конструкции.

Анализ характера трещинообразования, представленный на рис. 9, показывает наличие как нормальных, так и наклонных трещин. Расчетные результаты свидетельствуют о том, что сжимающие напряжения в бетоне, а также растягивающие напряжения в арматуре приближаются к их предельным сопротивле-

ниям. В связи с этим рассмотрим вариант усиления конструкции путем применения системы внешнего армирования, при котором исходная конструкция, не имеющая трещин, будет оклеена композитным материалом.

На рис. 10 показана модель усиленной конструкции, где для повышения прочности использованы хомуты, а вдоль нижней грани добавлена укрепляющая лента. Усиление выполнено следующим образом: один слой хомутов толщиной 0,128 мм и три слоя ленты на нижней грани конструкции общей толщиной 0,384 мм ($3 \times 0,128$ мм).

Результаты расчетов показывают, что максимальные вертикальные перемещения (прогиб) усиленной конструкции составляют 6,47 мм, что значительно меньше по сравнению с прогибом в неусиленном варианте, где он достигал 7,36 мм.

Как видно из рис. 11, на участках конструкции, покрытых слоями композитного материала (хомутами), значения сжимающих напряжений меньше, чем на открытых участках бетона. Это указывает на то, что система внешнего армирования эффективно снижает напряжения в усиленных зонах, перераспределяя нагрузку и повышая общую прочность конструкции.

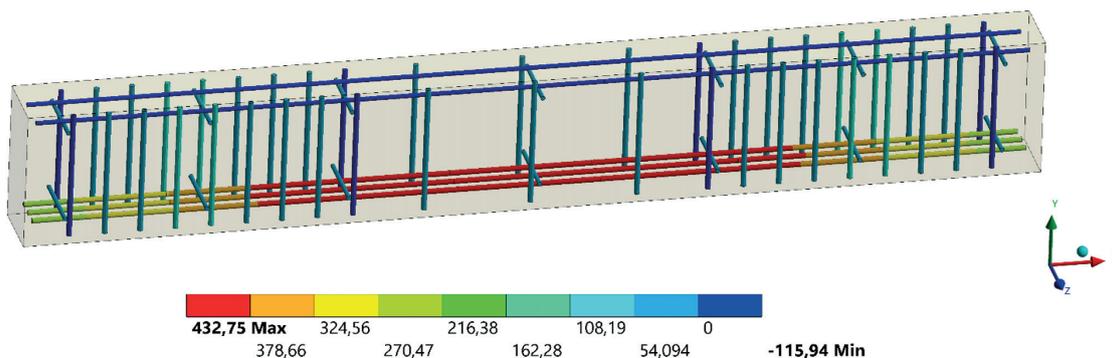


Рис. 8. Этап 2. Напряжения в арматуре, МПа
Fig. 8. Stage 2. Stresses in the reinforcement, MPa

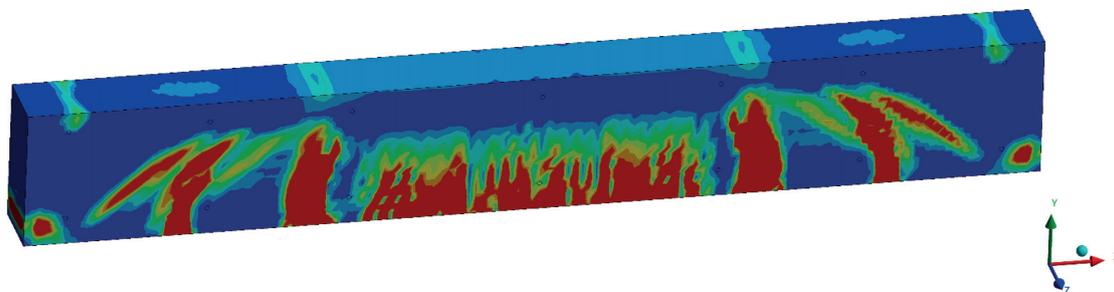


Рис. 9. Этап 2. Характер трещинообразования
Fig. 9. Stage 2. The pattern of cracking

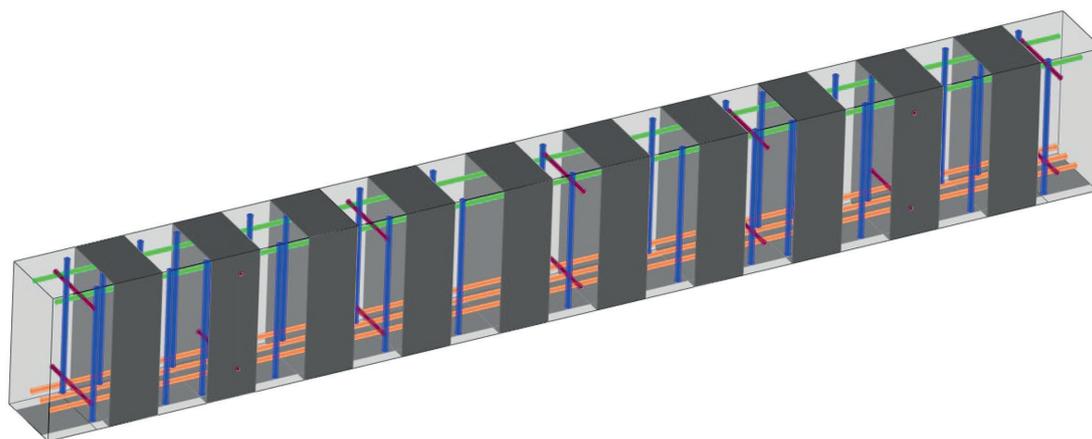


Рис. 10. Схема усиления композитным материалом
Fig. 10. Composite material reinforcement scheme

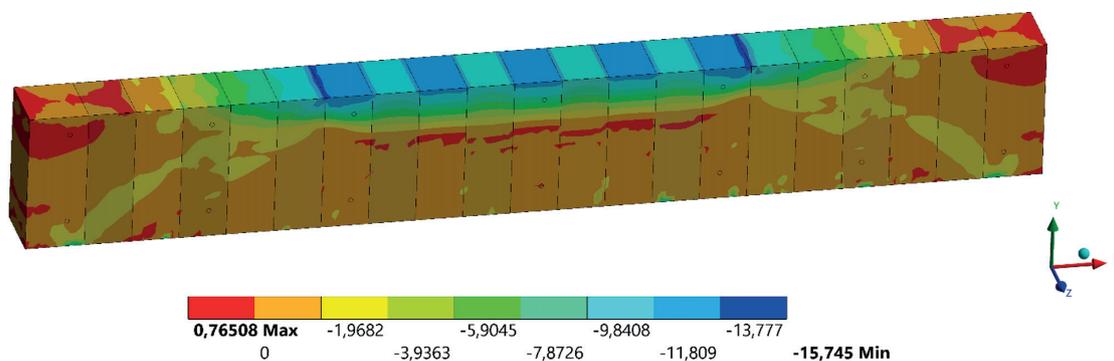


Рис. 11. Этап 3. Горизонтальные напряжения в бетоне, МПа
Fig. 11. Stage 3. Horizontal stresses in concrete, MPa

На рис. 12 также демонстрируется, что трещины в бетоне сосредотачиваются вдоль граней, покрытых композитным материалом (хомутами), тогда как под самими хомутами трещинообразование практически отсутствует, в отличие от неусиленной конструкции. Это подтверждает эффективность внешнего армирования в предотвращении появления трещин в усиленных участках.

Распределение напряжений в арматуре после усиления аналогично представленному на рис. 8, однако

максимальные растягивающие напряжения в рабочей арматуре в нижней части конструкции снизились до 357,2 МПа, тогда как в неусиленном состоянии они составляли 432,75 МПа. Таким образом, благодаря применению системы внешнего армирования напряжения в рабочей арматуре снизились на 17,46 %, что способствует увеличению долговечности и надежности конструкции.

Напряжения в композитном материале, как видно из рис. 13, составляют 705,4 МПа, что значительно

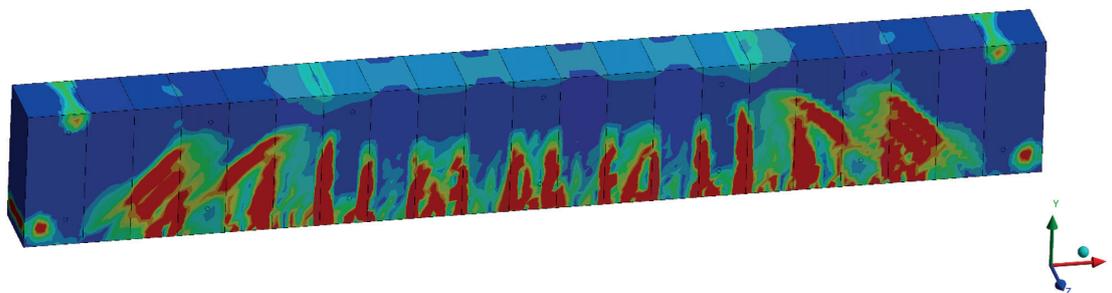


Рис. 12. Этап 3. Характер трещинообразования
Fig. 12. Stage 3. The pattern of cracking

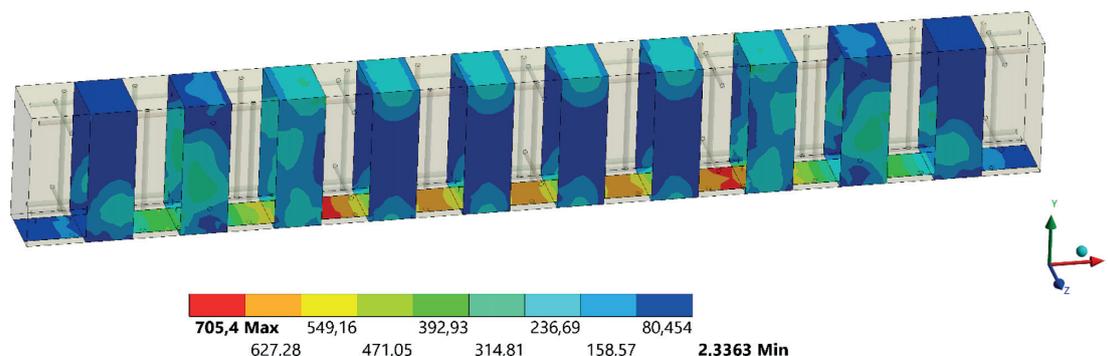


Рис. 13. Этап 3. Напряжения в композитном материале, МПа
Fig. 13. Stage 3. Stresses in composite material, МПа

ниже предела прочности композита $R_f = 2400$ МПа. Это подтверждает перераспределение части нагрузок с рабочей арматуры на композитный материал. Таким образом, использование системы внешнего армирования эффективно уменьшает нагрузку на арматуру, снижая ее напряжения и увеличивая общую несущую способность и долговечность конструкции. При этом несущая способность конструкции увеличилась с 126,75 до 167,31 кН, т. е. в 1,32 раза.

Выводы

В ходе исследования выполнено расчетное обоснование прочности железобетонной балки, усиленной композитными материалами с использованием метода конечных элементов.

На первом этапе исследования разработана упругая конечно-элементная модель, описывающая поведение бетона с начальным модулем деформации, без учета стержневой арматуры и трещинообразования. Проведен анализ распределения упругих напряжений под действием статических нагрузок. На основании полученных напряжений, через их интегрирование по вертикальному сечению в пролетной зоне, определены внутренние усилия (действующие моменты). В дальнейшем на основе определенных усилий с учетом работы железобетона на III стадии и примени-

ем формул чистого изгиба выполнен расчет необходимой площади армирования.

На втором этапе исследования была разработана конечно-элементная модель, включающая:

- нелинейную деформационную модель бетона;
- учет процессов трещинообразования;
- рабочее стержневое армирование, рассчитанное на первом этапе.

Проведены итерационные расчеты напряженно-деформированного состояния железобетонной конструкции. В результате определены фактические прогибы конструкции (7,36 мм), действующие напряжения в бетоне сжатой зоны (14,49 МПа) и стержнях арматуры (432,75 МПа), а также характер трещинообразования.

Результаты расчетов под действием статических нагрузок показали, что напряжения в арматурных стержнях (432,75 МПа) достигают предела текучести, соответствующего нормативному сопротивлению арматуры (435 МПа). Одновременно в сжатой зоне бетона в центре пролета напряжения (14,49 МПа) также достигают нормативного сопротивления материала (14,50 МПа). Это свидетельствует о достижении предельного состояния железобетонной конструкции при заданной нагрузке и конструктивных параметрах (3 Ø 12).

Анализ напряженно-деформированного состояния показал, что эпюра напряжений в сжатой зоне бето-

на имеет треугольную форму, а высота сжатой зоны составляет около 100 мм. В то же время при аналитических расчетах требуемого армирования, в соответствии с нормативной документацией, используется упрощенная прямоугольная эпюра сжатой зоны бетона, принимаемая со значением сопротивления бетона. В этих расчетах высота сжатой зоны составляет 69 мм.

Таким образом, высота сжатой зоны бетона, определенная в аналитических расчетах, меньше, чем в расчетах напряженно-деформированного состояния. Однако величины сжимающей силы в сжатой зоне бетона остаются сопоставимыми в обоих случаях.

На следующем этапе исследований была создана конечно-элементная модель, аналогичная разработанной на втором этапе, но дополненная системой внешнего армирования из композитного материала. Целью модели стало изучение влияния композитного армирования на несущую способность конструкции.

Усиление конструкции за счет внешнего армирования привело к уменьшению максимального прогиба с 7,36 до 6,47 мм, что свидетельствует о повышении жесткости конструкции. Кроме того, растягивающие напряжения в рабочей арматуре снизились на 17,46 % (с 432,75 до 357,2 МПа), что способствует увеличению ее несущей способности.

Композитный материал уменьшает вероятность образования трещин в усиленных зонах, концентрируя их по краям покрытия и предотвращая трещинообразование под слоем композита.

Использование композитного материала позволило перераспределить часть напряжений с арматуры, что подтверждается полученными напряжениями в композите, составляющими 705,4 МПа (меньше его предельной прочности).

В результате усиления несущая способность конструкции возросла с 126,75 до 167,31 кН, что на 32 % выше, чем в неусиленном состоянии.

Таким образом, использование системы внешнего армирования на основе композитных материалов является эффективным методом усиления железобетонных конструкций, особенно для условий высоких нагрузок и в условиях трещинообразования.

В дальнейшей работе планируется проведение натурных экспериментальных исследований для верификации результатов расчетных исследований. Особое внимание будет уделено учету динамических воздействий, анализу деградации железобетонных конструкций, влиянию температурно-влажностных факторов, а также расчетам, учитывающим наличие строительных межблочных швов.

Список литературы / References

- Jawdhari A., Peiris A., Harik I. Experimental study on RC beams strengthened with CFRP rod panels. *Engineering Structures*. 2018, vol. 173, pp. 693–705.
- Jawdhari A., Harik I. Finite element analysis of RC beams strengthened in flexure with CFRP rod panels. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 163, pp. 751–766.
- Pham T.M., Hadi M.N.S., Youssef J. Optimized FRP wrapping schemes for circular concrete columns under axial compression. *Journal of Composites for Construction*. 2015, vol. 19, no. 6, p. 04015015.
- Erki M.-A., Meier M.U. Impact loading of concrete beams externally strengthened with CFRP laminates. *Journal of Composites for Construction*. 1999, vol. 3, no. 3, pp. 117–124.
- White T.W., Soudki K.A., Erki M.-A. Response of RC beams strengthened with CFRP laminates and subjected to a high rate of loading. *Journal of Composites for Construction*. 2001, vol. 5, no. 3, pp. 153–162.
- Lisichkin S.E., Rubin O.D., Pashchenko F.A. Results of studies on strengthening retaining walls with composite materials. *Power Technology and Engineering*. 2021, vol. 55, no. 3, pp. 373–379.
- Лисичкин С.Е., Рубин О.Д., Пащенко Ф.А. Результаты исследований усиления подпорных стен композитными материалами // *Гидротехническое строительство*. 2021. № 4. С. 35–42.
- Lisichkin S.E., Rubin O.D., Pashchenko F.A. The results of research of retaining walls strengthening with composite materials. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*. 2021, no. 4, pp. 35–42. (In Russian).
- Пащенко Ф.А., Лисичкин С.Е., Рубин О.Д. Экспериментальное обоснование усиления подпорных стен. В сборнике: Инженерные системы. Труды научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов. В 2-х томах. Под общей редакцией М.Ю. Мальковой. 2020. С. 15–21.
- Pashchenko F.A., Lisichkin S.E., Rubin O.D., Experimental substantiation of reinforcement of retaining walls. In the collection: Engineering systems. Proceedings of the scientific and practical conference with international participation dedicated to the 60th anniversary of the Peoples' Friendship University of Russia. In 2 volumes. Under the general editorship of M.Yu. Malkova. 2020, pp. 15–21. (In Russian).
- Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Баклыков И.В., Бекин Н.В., Фролов К.Е. Расчетное обоснование технического решения по усилению железобетонного перекрытия машинного зала ГЭС // *Строительство: наука и образование*. 2019. Т. 9. № 1 (31). С. 4.
- Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Baklykov I.V., Bekin N.V., Frolov K.E. Estimated justification of technical decision on strengthening reinforced concrete machine hall floor. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*. 2019, vol. 9, no. 1 (31), p. 4. (In Russian).

10. Рубин О.Д., Антонов А.С., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е., Лисичкин А.С. Обоснование решения по усилению железобетонных конструкций после кратковременных ударных нагрузок, на примере ГЭС Айурикин // *Строительство: наука и образование*. 2019. Т. 9. № 3 (33). С. 6.
10. Rubin O.D., Antonov A.S., Lisichkin S.E., Frolov K.E., Lisichkin A.S. Grounds for the decision to strengthen reinforced concrete structures after short-term impulse loads, using Alluriquin HPP as an example. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie = Construction: Science and Education*. 2019, vol. 9, no. 3 (33), p. 6. (In Russian).
11. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Разработка методики расчета прочности изгибаемых балочных элементов ГТС, усиленных внешним армированием из углеродного волокна, в продольных сечениях. В сборнике: ДОКЛАДЫ ТСХА. Материалы международной научной конференции. 2018. С. 184–188.
11. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. Development of a methodology for calculating the strength of bent girder elements of GTS reinforced with external carbon fiber reinforcement in longitudinal sections. In the collection: REPORTS OF THE TAA. Materials of the international scientific conference. 2018, pp. 184–188. (In Russian).
12. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е. Результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций ГТС, имеющих межблочные строительные швы, усиленных внешним армированием из углеродного волокна // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 9 (120). С. 1067–1079.
12. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E. The results of the experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures with interconnect construction joints, reinforced by external reinforcement of carbon fiber. *Vestnik MGSU = Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*. 2018, vol. 13, no. 9 (120), pp. 1067–1079. (In Russian).
13. Menetrey P., Willam K.J. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*. Vol. 92, pp. 311–318.

**Информация об авторе /
Information about the author**

Игорь Вячеславович Баклыков, главный специалист отдела расчетных исследований гидротехнических сооружений, АО «Институт Гидропроект», Москва
e-mail: moscow_igor88@mail.ru

Igor V. Baklykov, Chief Specialist of the Department of Computational Studies of Hydraulic Structures, Hydroproject Institute JSC, Moscow
e-mail: moscow_igor88@mail.ru