

## Нелинейная конечно-элементная модель для расчета на поперечную силу двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона

*М.И.Ф. Салиб, М.М. Тамов*

*Кубанский государственный технологический университет*

**Аннотация:** Разработка методик расчета конструкций из сверхвысокопрочного бетона (далее – СВПБ) по прочности и деформациям является важным этапом на пути к внедрению этого инновационного материала в практику проектирования и строительства. В настоящей работе представлены результаты конечно-элементного моделирования работы двутавровых СВПБ-балок в зоне действия поперечных сил. Для стенок балок, находящихся в условиях плоского напряженного состояния, применена модель *SMM*, интегрированная в каркасном приложении *OpenSees*. Авторами добавлены новые классы материалов, реализующие осредненные законы деформирования СВПБ (с фиброй и без нее) и размещенной в нем арматуры. Расчеты показали хорошую сходимость с собственными результатами испытаний двутавровых СВПБ-балок авторов, а также с результатами опытов других исследователей.

**Ключевые слова:** прочность наклонных сечений, поперечная сила, сверхвысокопрочный сталефибробетон, двутавровые балки, *OpenSees*,

Одной из областей рационального применения сверхвысокопрочного бетона (СВПБ) по аналогии с другими видами мелкозернистого бетона являются конструкции с малыми толщинами профиля поперечного сечения. Примером изгибаемых конструкций такого рода являются двутавровые балки, применяемые в качестве пролетных строений и конструкций настилов для сооружений, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред [1]. Приопорная зона двутавровых балок испытывает сложное напряженно-деформированное состояние, характеризующееся действием в тонких стенках главных сжимающих и растягивающих напряжений, разделяющих их косыми трещинами на бетонные полосы. Разрушение балок происходит вследствие исчерпания несущей способности стенок.

В настоящей работе для моделирования двутавровых СВПБ-балок (с фибровым армированием и без такового) использована конечно-

элементная программная платформа (фреймворк) OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation). Впервые она была размещена в открытом доступе в начале 2000-х [2], и к настоящему времени образовала быстро увеличивающееся сообщество пользователей и разработчиков, вносящих вклад в развитие ее возможностей [3]. Исследователи отмечают способность OpenSees к быстрому, стабильному и эффективному решению нелинейных задач [4].

Для вычисления параметров НДС стенок железобетонных балок применена деформационная модель *Softened Membrane Model (SMM)*. Модель разработана по результатам экспериментальных исследований более чем 150 крупногабаритных железобетонных панелей, испытанных на специальном стенде, имитирующем плоское напряженное состояние. Модель устанавливает напряженно-деформированное состояние железобетонного мембранного элемента, к которому приложены касательные и нормальные напряжения, совокупностью уравнений равновесия и совместности деформаций и законов деформирования материалов [5]. Ранее исследователями Университета Хьюстона в *OpenSees* были внедрены классы материалов *ConcreteZ01*, *SteelZ01*, *RCPlaneStress*, являющиеся компонентами модели SMM. Указанные материалы нельзя применить для моделирования работы СВПБ-балок, так как в их основе лежат законы деформирования для обычного тяжелого бетона без дисперсного армирования. Поэтому для задач настоящего исследования в *OpenSees* нами были добавлены следующие классы материалов:

- одноосный материал для сверхвысокопрочного бетона;
- одноосный материал для арматуры.

Новым материалам были присвоены имена *SteelM01* и *ConcreteM01*. В код программы, находящийся в открытом доступе на портале *GitHub* [6],

внесены соответствующие дополнения инструментами интегрированной среды для разработки программного обеспечения *Microsoft Visual Studio*. Затем произведена сборка программы в исполняемый файл с расширением *.exe*.

Диаграммы деформирования *сверхвысокопрочного бетона и сталефибробетона при сжатии* взяты из работы Ю. Жанг [7] и дополнены коэффициентами разупрочнения по предложению Н.С. Хофмана [8]:

стадия С1 (восходящая ветвь) при  $\bar{\varepsilon}_2 \leq \zeta \varepsilon_0$

$$\sigma_2^c = \zeta \sigma_{pk} \left[ 2\bar{\varepsilon}_2 / \zeta \varepsilon_0 - (\bar{\varepsilon}_2 / \zeta \varepsilon_0)^2 \right],$$

стадия С2 (ниспадающая ветвь) при  $\zeta \varepsilon_0 \leq \bar{\varepsilon}_2 \leq \varepsilon_{20}$

$$\sigma_2^c = \zeta \sigma_{pk} \left[ 1 - \left( \frac{(1 - \lambda_{rs})(\bar{\varepsilon}_2 / \zeta \varepsilon_0)}{\varepsilon_{20} - \zeta \varepsilon_0} \right) \right],$$

стадия С3 (пластическая зона) при  $\bar{\varepsilon}_2 \geq \varepsilon_{20}$

$$\sigma_2^c = \lambda_{rs} \sigma_{pk},$$

где  $\sigma_2^c$  – сжимающие напряжения в бетоне;  $\bar{\varepsilon}_2$  – одноосные деформации сжатия по оси 2;  $\zeta$  – коэффициент разупрочнения;  $\sigma_{pk}, \varepsilon_0$  – пиковые сжимающие напряжения и соответствующие им деформации бетона.

Осредненная диаграмма деформирования *сверхвысокопрочного бетона при растяжении* записана в соответствии с результатами работы Х. Радара в следующем виде [9]:

стадия Т1 до образования трещин:

$$\sigma_1^c = \frac{\sigma_c^t}{\varepsilon_c^t} \varepsilon_c,$$

Стадия Т2 после образования трещин:

$$\sigma_1^c = \sigma_c^t \alpha e^{-\beta \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c^t} \right)},$$

где  $\sigma_c^t$  и  $\varepsilon_c^t$  – растягивающие напряжения при образовании трещин и соответствующие этим напряжениям деформации;  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры, зависящие от коэффициента армирования в направлении действия напряжений.

Осредненная диаграмма деформирования *сверхвысокопрочного сталефибробетона при растяжении* принята в соответствии с предложением Н.С. Хофмана в следующем виде [8]:

Стадия T1 при  $0 < \bar{\varepsilon} \leq \varepsilon_{cy}$

$$\sigma_1^c = E'_c \bar{\varepsilon}_1,$$

Стадия T2 при  $\varepsilon_{cy} < \bar{\varepsilon} \leq \varepsilon_{cpk}$

$$\sigma_1^c = E''_c \bar{\varepsilon}_1,$$

Стадия T3 при  $\bar{\varepsilon} > \varepsilon_{cpk}$

$$\sigma_1^c = E'''_c \bar{\varepsilon}_1,$$

Модули упругости на стадиях T1, T2, и T3 будут соответственно равны:

$$E'_c = \frac{f_{cy}}{\varepsilon_{cy}},$$
$$E''_c = \frac{f_{cpk} - f_{cy}}{\varepsilon_{cpk} - \varepsilon_{cy}},$$
$$E'''_c = \frac{-f_{cpk}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{cpk}}$$

где  $f_{cy}$  и  $\varepsilon_{cy}$  – напряжения при наступлении условной «текучести» сталефибробетона и соответствующие им деформации;  $f_{cpk}$  и  $\varepsilon_{cpk}$  – пиковые растягивающие напряжения и соответствующие им деформации;  $\varepsilon_{max}$  – предельные деформации сталефибробетона при растяжении.

Характеризующие модель данные – расчетная схема, граничные условия, интегратор и пр. – в *OpenSees* вводят кодом на языке

программирования *TCL*. Схема построенной для расчета балок конечно-элементной модели показана на рисунке 1.

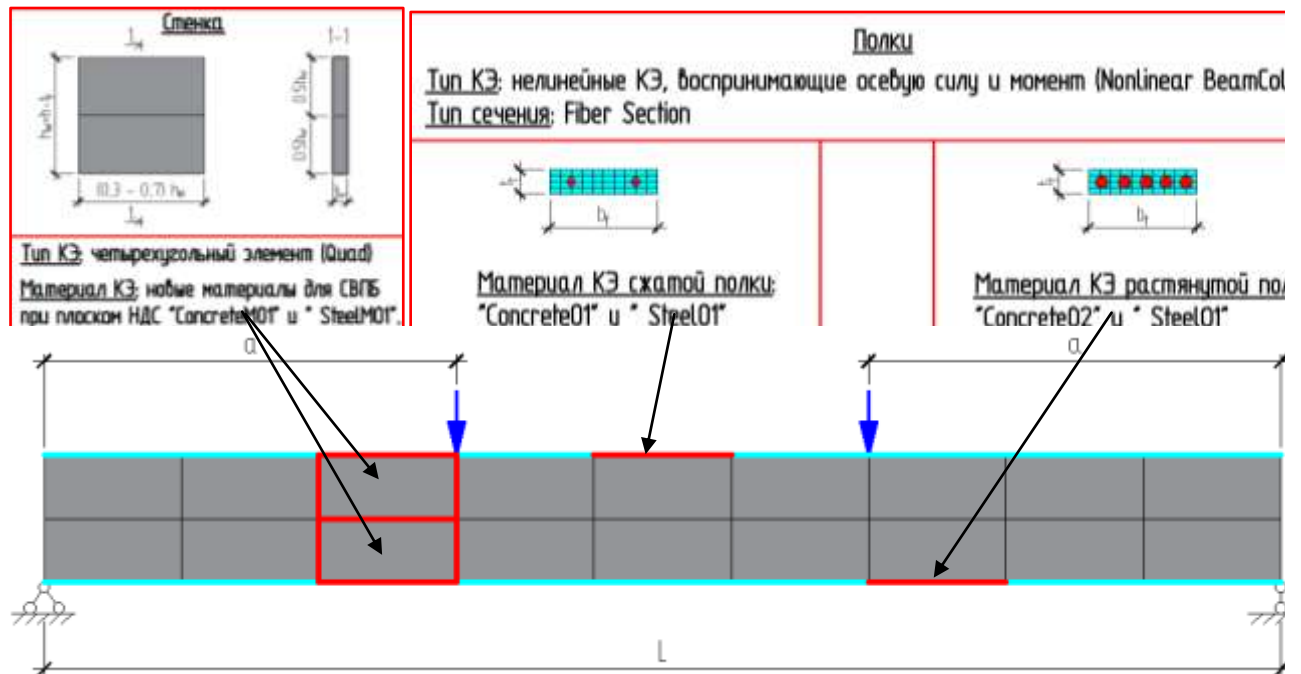


Рис. 1. – Расчетная конечно-элементная модель

Для калибровки модели были использованы результаты испытаний двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона, представленные в статьях Магуреану [10], Месзоли [11] и Темике [12]. Сечения балок приведены на рисунке 2.8. В рассмотренной выборке прочность бетона при сжатии охватывает диапазон 166–236 МПа, коэффициент стержневого поперечного армирования – 0,6–1,31 %. Выборка включает балки с фибровым армированием и без такового. В результате калибровки уточняли *густоту конечно-элементной сетки стенок балок и шаг нагружения модели*. Установлено, что расчетные диаграммы деформирования балок оказываются наиболее близки к расчетным при разбиении стенки на два элемента по высоте (согласуется с аналогичными результатами для балок из обычного тяжелого бетона [13, 14]),

а оптимальным диапазоном шагов нагружения (накладываемых перемещений) для предложенной модели является  $0,0005 \div 0,001$  мм.

На рисунке 2 приведены примеры совмещения опытных диаграмм деформирования Темике [12] с расчетными, полученными при помощи откалиброванной модели. Диаграммы достаточно хорошо согласуются друг с другом. Средняя разница между опытными  $Q_{\text{test}}$  и расчетными  $Q_{\text{os}}$  разрушающими поперечными силами составляет около 9%. Максимальная разница между  $Q_{\text{test}}$  и  $Q_{\text{os}}$  при этом равна 12,3 %.

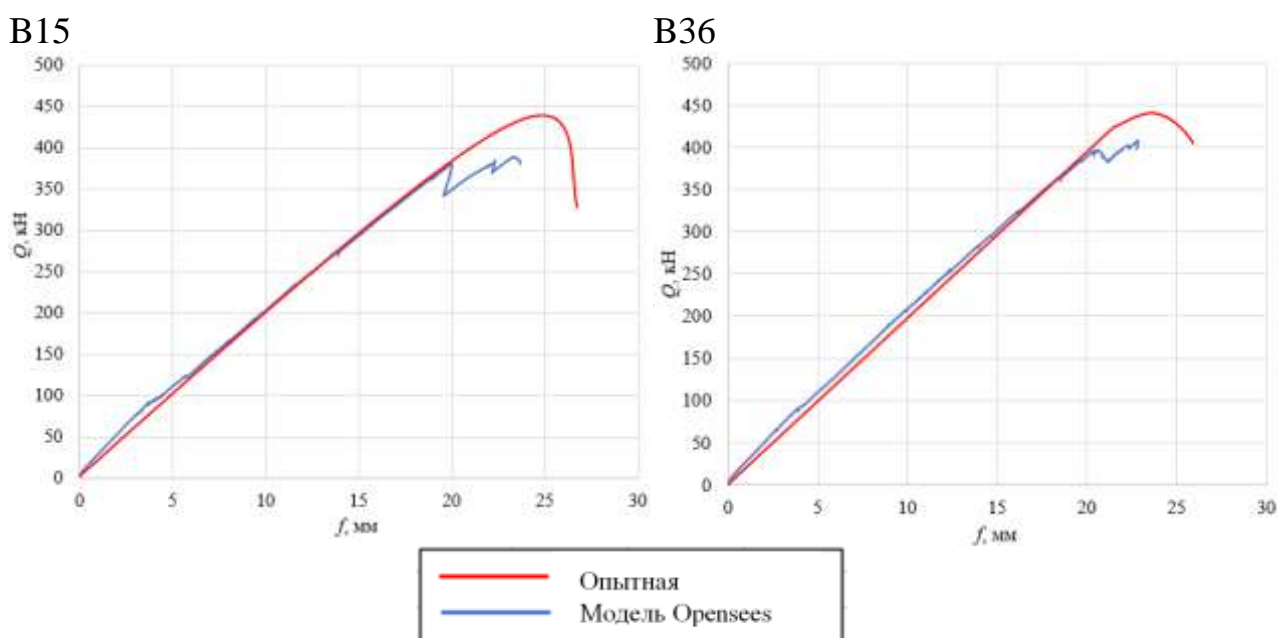


Рис. 2. – Опытные и расчетные диаграммы деформирования балок

Полученная модель была апробирована на 14 двутавровых СВПБ-балках, испытанных нами в рамках специального экспериментального исследования [15]. Варьируемыми в опытах параметрами являлись коэффициент фибрового и поперечного стержневого армирования, пролет среза нагружения. Построенные для всех испытанных нами балок расчетные диаграммы деформирования приведены на рисунках 3 – 5.

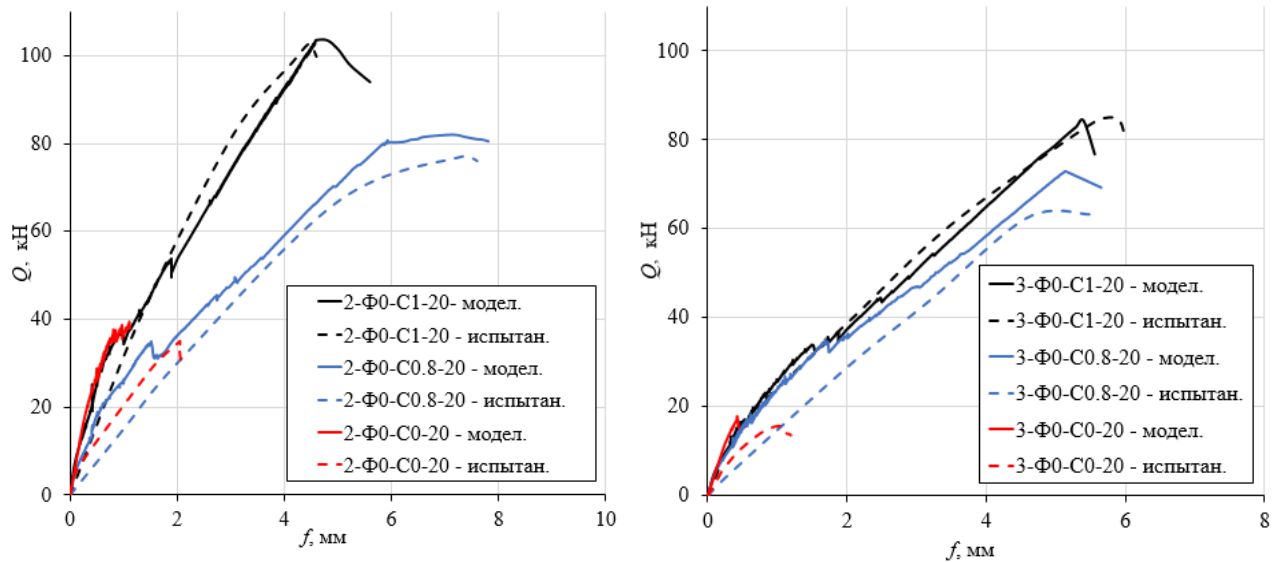


Рис. 3. – Опытные и расчетные диаграммы деформирования балок с  $V_f=0\%$ :  $a/h_0=2$  (а),  $a/h_0=3$  (б)

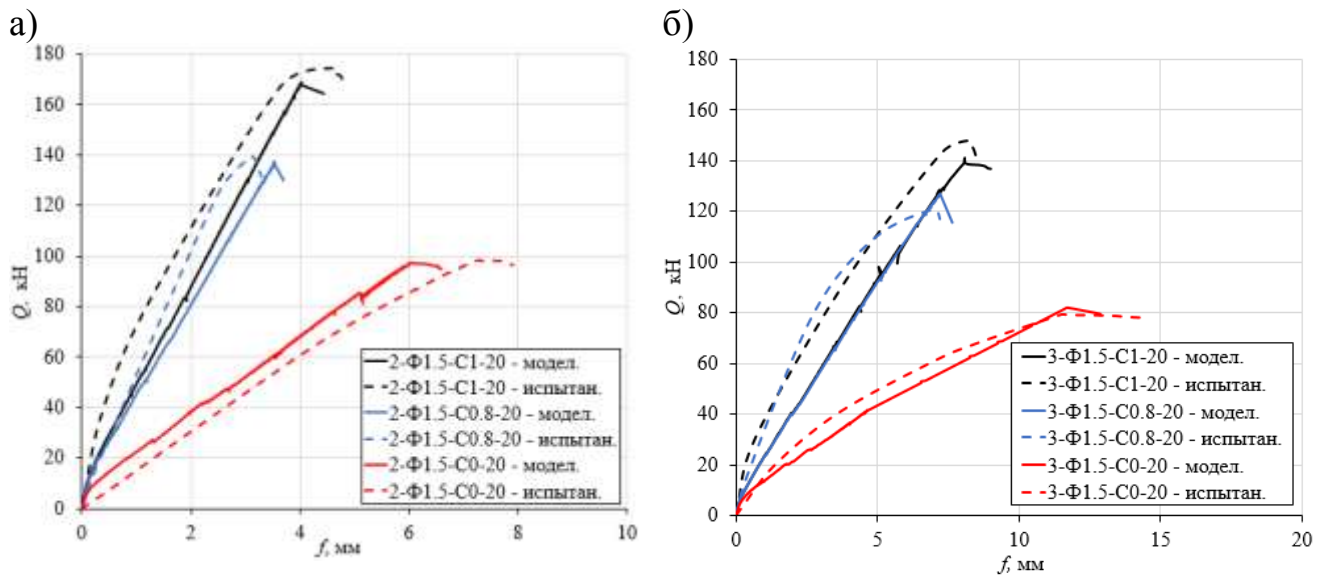


Рис. 4. – Опытные и расчетные диаграммы деформирования балок с  $V_f=1.5\%$ :  $a/h_0=2$  (а),  $a/h_0=3$  (б)

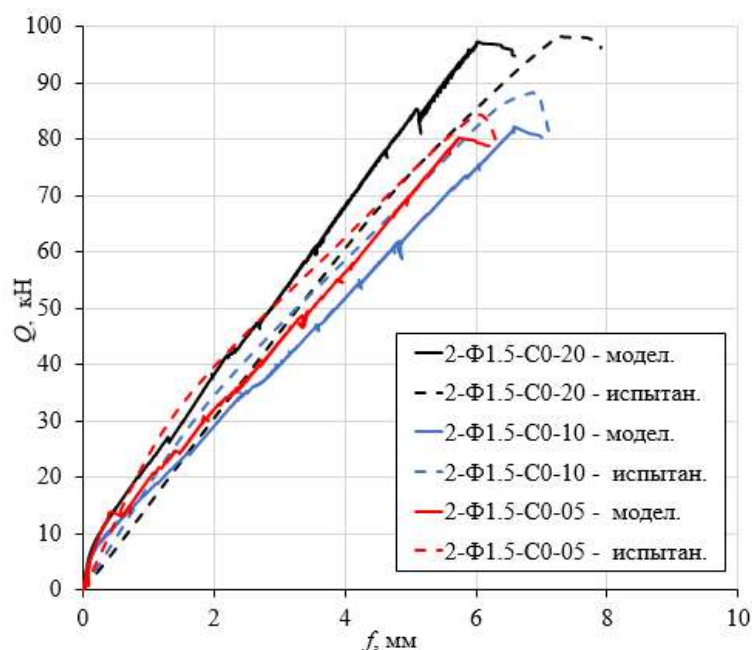


Рис. 5. – Опытные и расчетные диаграммы деформирования балок с  $V_f=1.5\%$ , отличающихся шириной сжатой полки  $b_f$

Средняя разница между разрушающими поперечными силами  $Q_{os}$  (вершина диаграммы) и опытными значениями  $Q_{exp}$  составляет 7%, максимальная разница – 15,3 %.

### Заключение

1. Исследована возможность нелинейного моделирования напряженно-деформированного состояния двутавровых СВБП-балок при разных пролетах среза, коэффициентах фибрового и поперечного стержневого армирования. Для этого задействованы существующие осредненные модели с целью расчета параметров плоского напряженного состояния железобетона и реализующие их компоненты в каркасном конечно-элементном приложении *OpenSees*. Выполнено программирование новых классов материалов, реализующих осредненные законы деформирования СВБП и размещенной в нем арматуры.



2. Калибровкой модели с использованием результатов опытов других авторов были определены оптимальные размеры ячейки сетки конечных элементов в стенках балок и величина шага нагружения для интегратора.

3. Полученная модель позволяет производить построение достаточно точных диаграмм деформирования балок для всех этапов нагружения. В части вычисления разрушающих поперечных сил модель также показывает хорошую сходимость с экспериментальными данными.

4. Результаты работы подтверждают возможность использования предложенной конечно-элементной модели с новыми классами материалов для расчета двутавровых СВПБ-балок по прочности и по прогибам в зонах действия поперечных сил.

### Литература

1. Салиб М.И.Ф., Тамов М.М. Прочность наклонных сечений двутавровых балок из сверхвысокопрочного бетона // Инженерный вестник Дона, 2024, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952).

2. McKenna, F., Fenves, G. L., Scott M. H., Jeremic B. Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) // Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California. 2000. 465 P. URL: [opensees.berkeley.edu/](http://opensees.berkeley.edu/).

3. Jiang, J., Jiang L., Kotsovinos P., Zhang J., A Usmani., Mckenna F., Li G.Q. OpenSees Software Architecture for the Analysis of Structures in Fire // Journal of Computing in Civil Engineering. 2013. Vol. 29. 13 P.

4. Mortazavi S.J., Mansouri I., Awoyera P., Naser M.Z. Implementation of new elements and material models in OpenSees software to account for post-earthquake fire // Structures. 2020. Vol.27. pp. 1777–1785.

5. Wang, J. Constitutive Relationships of Prestressed Concrete Membrane Elements: Ph.D. Dissertation - Houston, Texas. 2006. 306 P.
6. OpenSees Source Code Repository. GitHub URL: [github.com/OpenSees/OpenSees](https://github.com/OpenSees/OpenSees) (дата обращения: 01.07.2023).
7. Zhang, Y., Xin H., Correia J.A.F.O. Fracture evaluation of ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) // Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 120. pp .1-21.
8. Hoffman, N.S. - Constitutive relationships of prestressed steel fiber concrete membrane elements. University of Houston. Texas, USA. 2010. 232 P.
9. Rahdar, H.A., Ghalehnovi M. Post-cracking behavior of UHPC on the concrete members reinforced by steel rebar // Computers and Concrete. 2016. Vol.18. №1 pp.139-154.
10. Magureanu, C., Sosa I., Negrutiu C., Heghes B. Bending and shear behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete // High Performance Structures and Materials V. 2010. Vol.112. pp. 79–89.
11. Meszoly, T., Randl N. Shear Behavior of Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams // Engineering Structures. 2018. Vol. 168. pp. 119–127.
12. Thiemicke J., Fehling E. Experimental and numerical investigations on I-shaped UHPC-beams with combined reinforcement under shear load // In book: Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition. 2016. pp.1363-1367.
13. Pochinok V., Tamov M., Greshkina E. Nonlinear shear analysis of I-shaped beams with arbitrary inclination angles of shear reinforcement // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. 7 P.
14. Тамов М. М., Руденко О. В., Усанов С. В. Нелинейная конечно-элементная модель для расчета прочности стенки двутавровых балок с



КОМПОЗИТНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 1. С. 10–16.

15. Салиб М.И.Ф., Тамов М.М. Особенности образования и раскрытия наклонных трещин в двутавровых балках из сверхвысокопрочного бетона // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2023. № 6. С. 27–37.

### References

1. Salib M.I.F., Tamov M.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2024/8952).
2. McKenna, F., Fenves, G. L., Scott M. H., Jeremic B. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California. 2000. 465 P. URL: [opensees.berkeley.edu](http://opensees.berkeley.edu).
3. Jiang, J., Jiang L., Kotsovinos P., Zhang J., A Usmani., Mckenna F., Li G.Q. Journal of Computing in Civil Engineering. 2013. Vol. 29. 13 P.
4. Mortazavi S.J., Mansouri I., Awoyera P., Naser M.Z. Structures. 2020 Vol.27. pp.1777–1785.
5. Wang, J. Constitutive Relationships of Prestressed Concrete Membrane Elements: Ph.D. Dissertation. Houston, Texas. 2006. 306 p.
6. OpenSees Source Code Repository. GitHub. URL: [github.com/OpenSees/OpenSees](https://github.com/OpenSees/OpenSees) (дата обращения: 01.07.2023).
7. Zhang, Y., Xin H., Correia J.A.F.O. Engineering Failure Analysis. 2021. Vol. 120. pp. 1–21.
8. Hoffman, N.S. University of Houston. Texas, USA. 2010. 232 P.
9. Rahdar, H.A., Ghalehnovi M. Computers and Concrete. 2016. Vol.18 No.1. pp. 139-154.



10. Magureanu, C., Sosa I., Negrutiu C., Heghes B. High Performance Structures and Materials V. 2010. Vol.112. pp. 79–89.
11. Meszoly, T., Randl N. Engineering Structures. 2018. Vol. 168. pp. 119–127.
12. Thiemicke J., Fehling E. Insights and Innovations in Structural Engineering, Mechanics and Computation. 1st Edition. 2016. pp.1363-1367.
13. Pochinok V., Tamov M., Greshkina E. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 869. 7 P.
14. Tamov M. M., Rudenko O. V., Usanov S. V. E`lektronny`j setevoj politematicheskij zhurnal «Nauchny`e trudy` KubGTU». 2023. No. 1. pp. 10–16.
15. Salib M.I.F., Tamov M.M. E`lektronny`j setevoj politematicheskij zhurnal «Nauchny`e trudy` KubGTU». 2023(6) pp. 27–37.

**Дата поступления: 28.08.2024**

**Дата публикации: 01.10.2024**