



УДК 624.012.4

А. А. ВЕДЕРНИКОВА, канд. техн. наук, и. о. зав. кафедрой технологий информационного и математического моделирования

ПРОЦЕСС ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ В ПРЕДЕЛЬНЫХ И ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ СТАДИЯХ РАБОТЫ

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Тел.: (904) 605-65-88; эл. почта: alena@avedernikova.ru

Ключевые слова: трубобетонные конструкции, ТБК, обратный численно-аналитический метод, трубобетонные элементы.

В статье приводятся результаты сопоставления экспериментальных данных трубобетонных элементов конструкций, выполненных в разное время, с результатами расчета обратным численно-аналитическим методом. Данные приводятся как для предельной, так и запредельной работы в виде графиков деформирования конструкций под нагрузкой.

Введение

Целью данной работы является демонстрация возможностей обратного численно-аналитического метода применительно к сжатым с эксцентриситетом трубобетонным элементам конструкций, находящихся в предельных и запредельных стадиях работы.

Трубобетонные конструкции применяются в уникальных зданиях и сооружениях, например, в г. Санкт-Петербурге построено здание АО «Банк Санкт-Петербург» высотой 22 этажа с применением трубобетонных колонн [1], а в г. Гуанчжоу, Китай – телебашня “Canton Tower” высотой 600 м [2], несущий остов которой выполнен из трубобетонных элементов. Для таких зданий расчеты выполняются с учетом нормальных условий эксплуатации и аварийных ситуаций, которые могут привести к прогрессирующему обрушению. Интерес представляет возможность получить данные о напряженно-деформированном состоянии (НДС) элементов здания при различных уровнях развития деформаций, в том числе, превышающих предельные. Обратный метод расчета позволяет определять НДС и остаточную несущую способность, в том числе в запредельной стадии работы за счет оригинального подхода [3–5].

Анализ и методы исследования

Особенностью обратного численно-аналитического метода является обратная последовательность расчета, который ведется по приращению деформированных состояний, задаваемых в виде относительной деформации наиболее напряженного волокна. Напряженно-деформированное состояние и внутренние усилия в сечении трубобетонного элемента определяются на основе гипотезы плоских сечений и унифицированных диаграмм работы материалов

(по СП 63.13330.2016¹ и СП 16.13330.2017²). Из равенства внутренних и внешних сил определяются значения продольных сил и изгибающих моментов, действующих в сечении. Таким образом определяется прочность нормальных сечений. При расчете устойчивости учитывается развитие поперечных перемещений, которые определяются аналитически. Деформированные состояния наиболее нагруженного сечения задаются с учетом деформационных моментов, возникающих вследствие развития перемещений.

СП 385³ устанавливает предельные деформации для стали $\varepsilon_{s,lim}$ равными 0,025 и 0,01 (с физическим и условным пределом текучести). Для бетонов средней прочности установлены относительные предельные деформации равные $\varepsilon_{b,lim} = 0,0035$. СП 266⁴ задает предел для деформаций по формуле:

$$|\varepsilon_b| \leq \varepsilon_{b2};$$

где $\varepsilon_{b2} = 0,0035$.

В этом случае при превышении предельных деформаций для бетона и выключении бетона из работы трубобетонный элемент все еще обладает некоторым уровнем несущей способности за счет работы стальной трубы, что заметно и в ходе экспериментальных исследований, например, в работах *K. Cederwall* [6], *G. Muciaccia* [7].

Работа трубобетонного элемента условно может быть разбита на стадии до и после развития предельных деформаций. Точка перехода между этими состояниями будет фактическим параметром несущей способности (см. рис. 1), а точки, принадлежащие нисходящей кривой, будут соответствовать остаточной несущей способности (запредельной работе).

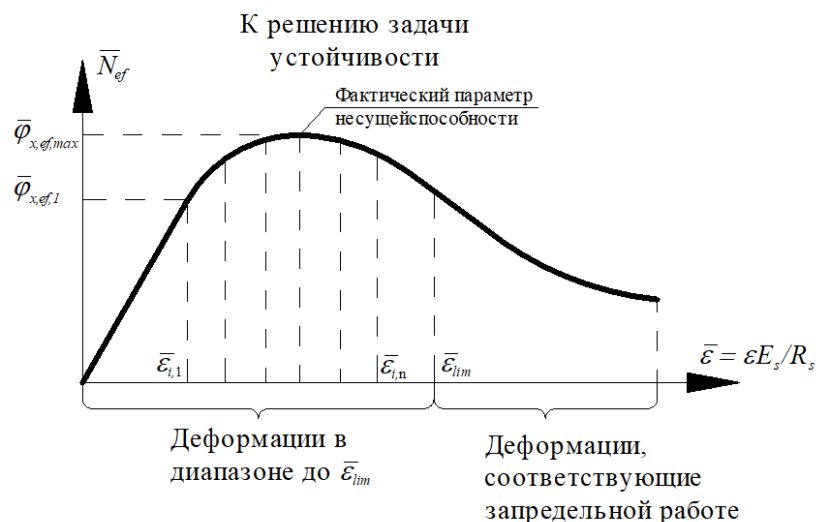


Рис. 1. Определение параметра фактической несущей способности

¹ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минстрой России. 2015. 168 с.

² СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. М.: Минстрой России, 2017. 148 с.

³ СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. М.: Стандартинформ. 2018. 24 с.

⁴ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. М.: Стандартинформ. 2016. 78 с.



Таким образом, можно задаваться нужным уровнем относительных деформаций в зависимости от решаемой задачи.

Результаты исследования. Сопоставление с данными экспериментов, проведенных зарубежными учеными

Для сопоставления выбраны имеющиеся в публикациях [6, 8–10] данные по графикам «прогиб-нагрузка». Выбор именно этой зависимости обусловлен тем, что приводится для большого количества экспериментальных образцов. Показатели снимались во время испытаний трубобетонных элементов. Данные по характеристикам трубобетонных элементов приведены в табл.

Таблица

Экспериментальные данные

№ стержня	H , мм	B , мм	t , мм	e_{0x} , мм	L , мм	R_s , МПа	R_b , МПа	E_b , МПа	$N_{\text{эксп}}$, кН
<i>H. Shakir-Khalil, J. Zegnische</i>									
1	80	120	5	16	2940	384,7	44	34000	260
2	80	120	5	40	2940	343,3	43	34000	210
<i>R.Q. Bridge</i>									
1	203	203	9,96	38	213,9	291	29,9	30000	1850
2	152,3	152,3	6,48	38	305	254	31,1	30000	675
3	152,3	152,3	6,48	64	305	254	31,1	30000	515
<i>K. Cederwall</i>									
1	120	120	5	20	3000	304	47	39000	610
2	120	120	8	20	3000	300	46	39000	760
3	120	120	8	20	3000	376	47	39000	870
4	120	120	8	20	3000	379	103	41000	1000
5	120	120	8	20	3000	379	39	39000	820

Полученные данные, представленные в виде графиков, можно условно разделить на две группы. В первой при достижении прогибов, соответствующих фактической несущей способности, дальнейшее поведение трубобетонного элемента не записывалось, и, таким образом, на графиках была представлена только восходящая кривая. Во второй группе с развитием деформаций был зарегистрирован пик, а затем и понижение нагрузки. Такие графики имеют восходящую и ниспадающую части кривой. Оба типа графиков представляют интерес для данного исследования. На рис. 2–11 показано, как обратный численно-аналитический метод предсказывает поведение экспериментального образца.

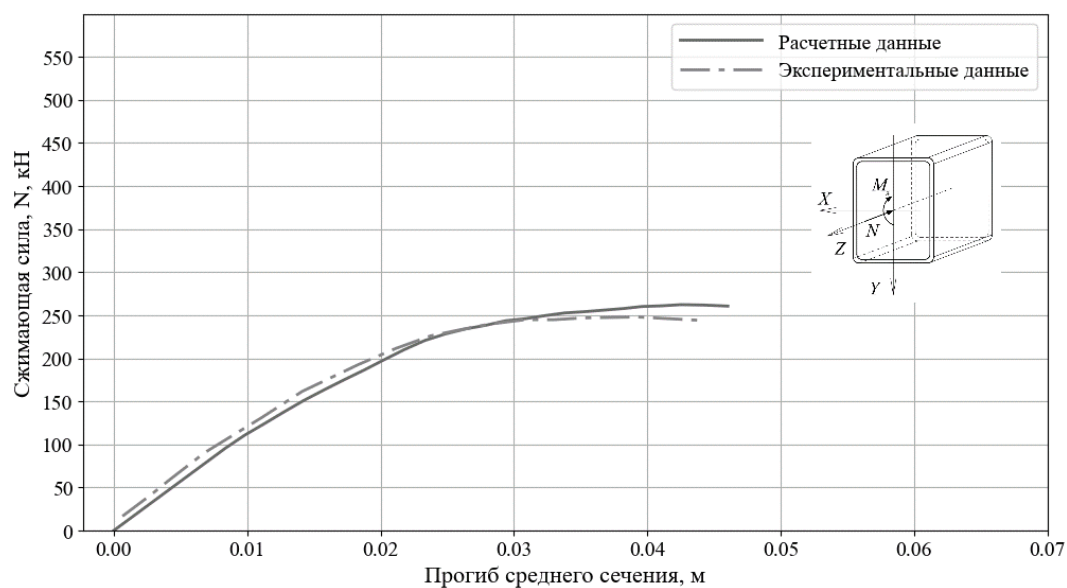


Рис. 2. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *H. Shakir-Khalil, J. Zegniche*: стержень № 1

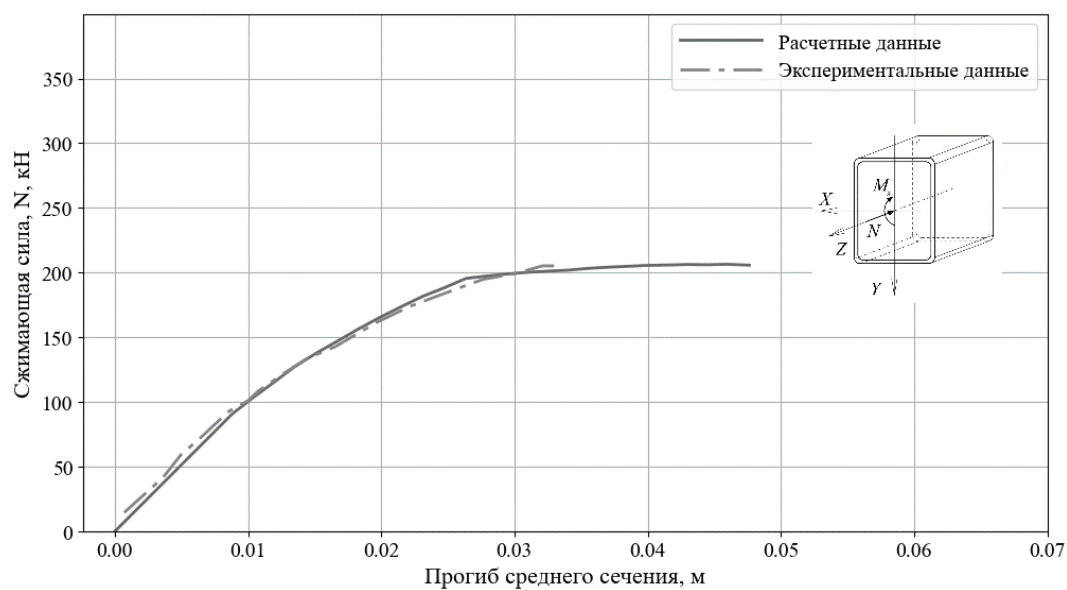
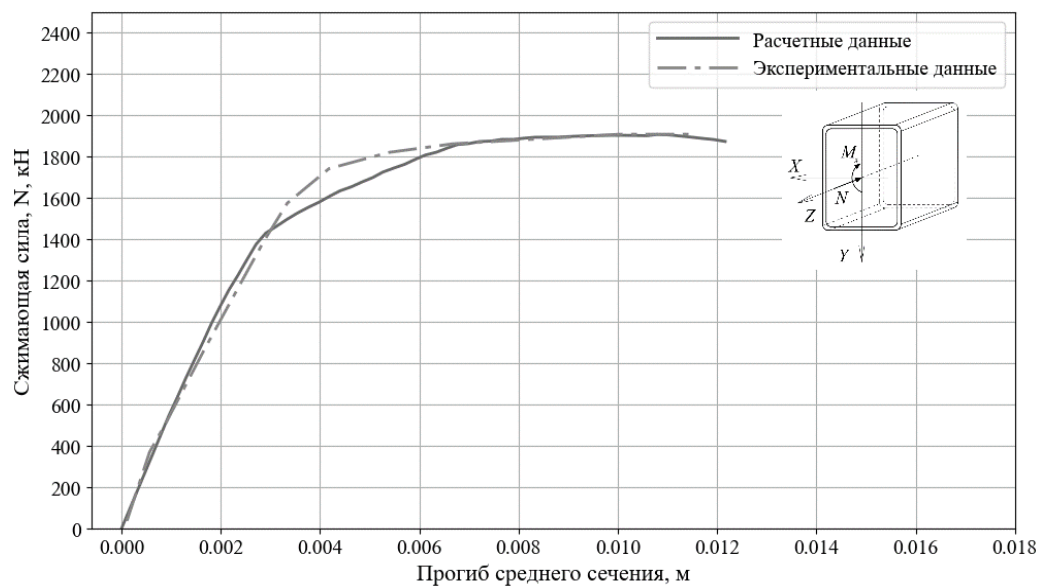
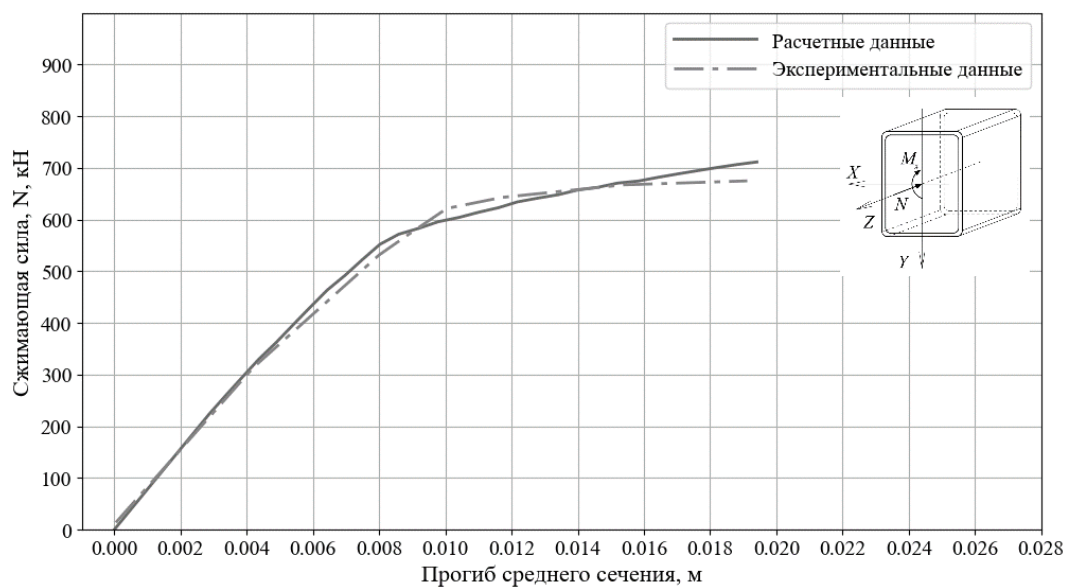


Рис. 3. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *H. Shakir-Khalil, J. Zegniche*: стержень № 2

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [6] для восходящей кривой экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую сходимость.

Рис. 4. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 1Рис. 5. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 2

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [8, 9] для восходящей кривой экспериментальных и расчетных данных показывает хорошую сходимость. Лишь на рис. 6 экспериментальные данные показывают меньшую несущую способность по сравнению с расчетными (около 10 %).

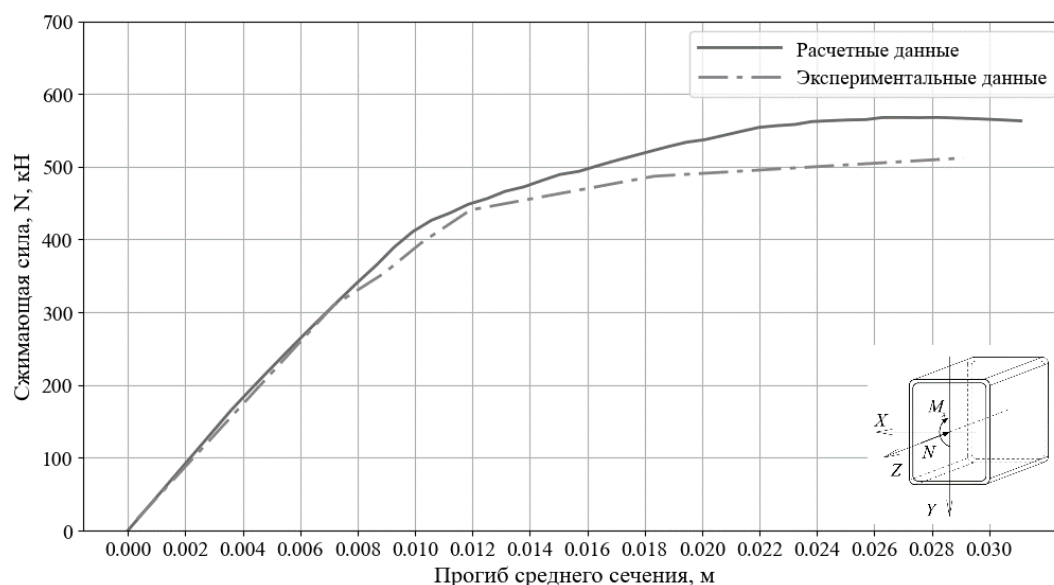


Рис. 6. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *R.Q. Bridge*: стержень № 3

Сопоставление графиков «прогиб-нагрузка» по работе [10] для восходящей и нисходящей кривых экспериментальных и расчетных данных показывает удовлетворительную сходимость. Результаты расчета показывают сходимость с экспериментальными данными в пределах 0–9 % (удовлетворительную). Нисходящая ветвь показывает, что при одинаковом уровне прогибов обратный метод дает более низкие значения остаточной несущей способности (в запас). Такое расхождение можно объяснить необходимостью уточнения диаграммы работы бетона в трубобетонном элементе. Примером такой диаграммы служит диаграмма деформирования бетона в работе *D. Liu* [11], которая имеет плавную ниспадающую кривую и применяется в том числе для бетона, заключенного в трубы прямоугольного сечения.

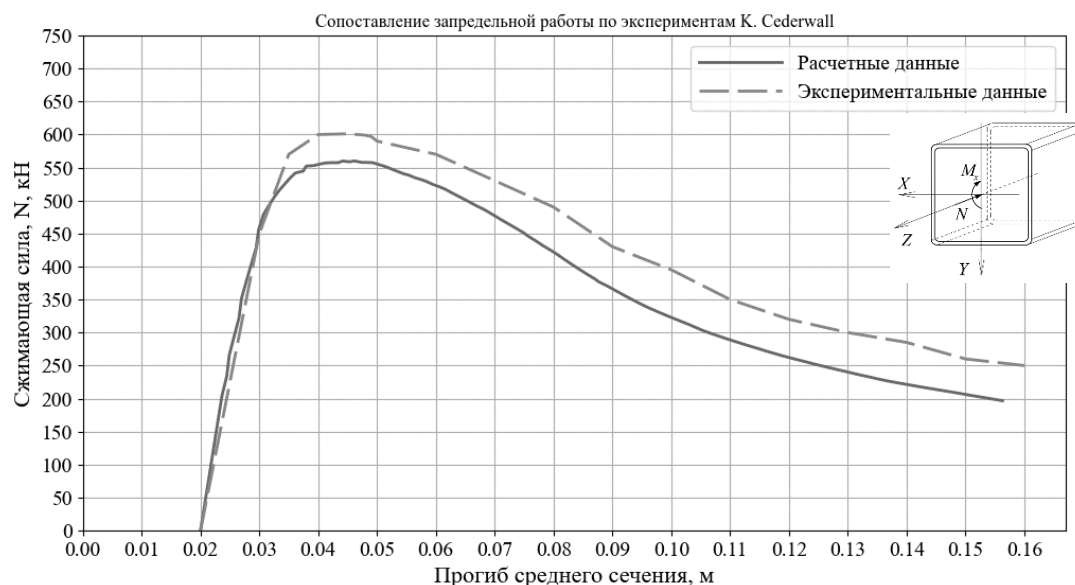


Рис. 7. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе *K. Cederwall*, стержень № 1

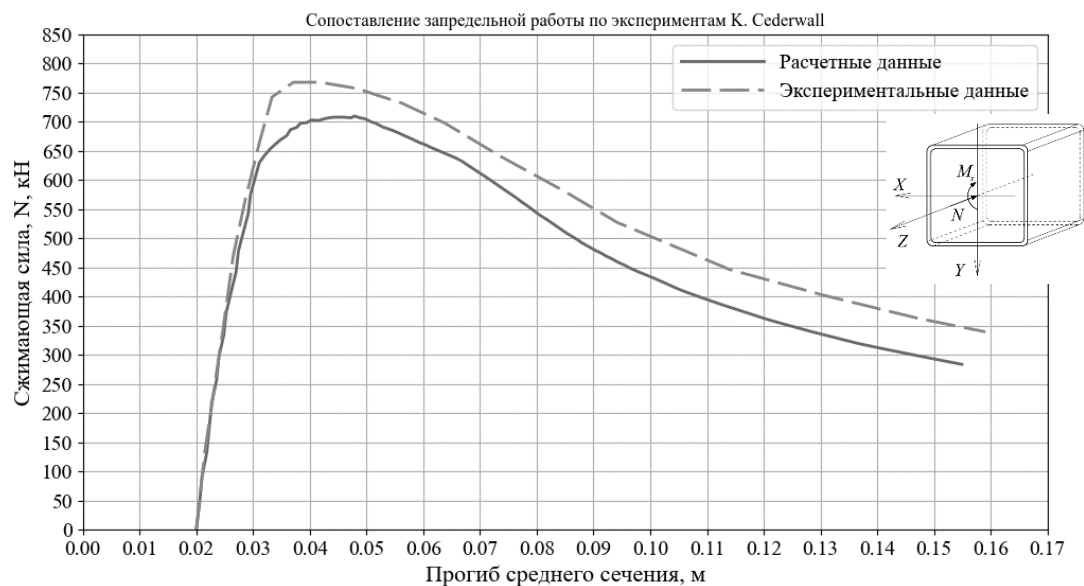


Рис. 8. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 2

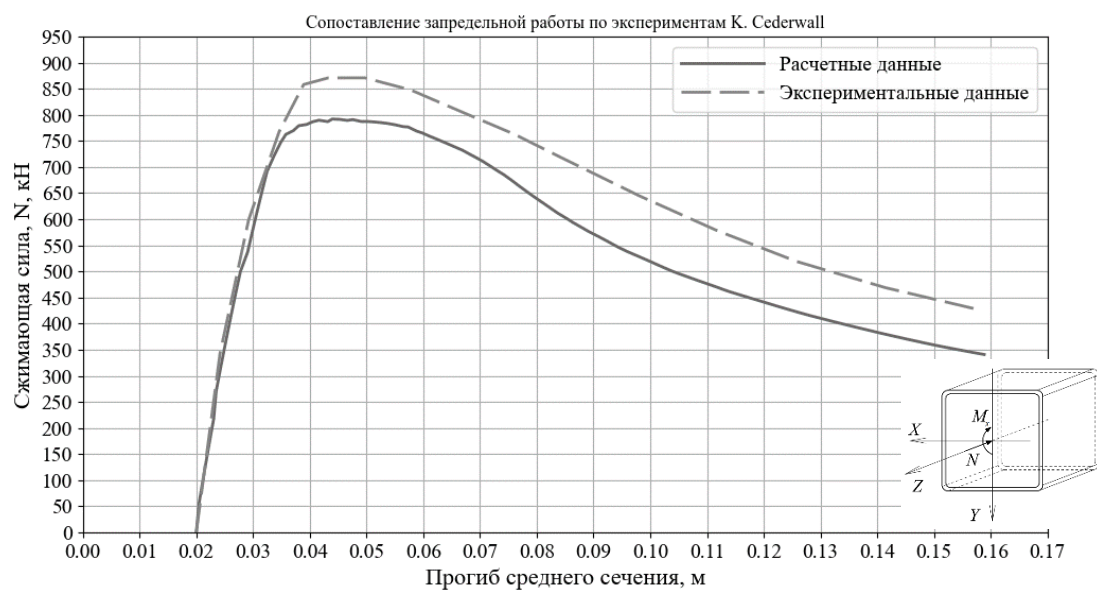


Рис. 9. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 3

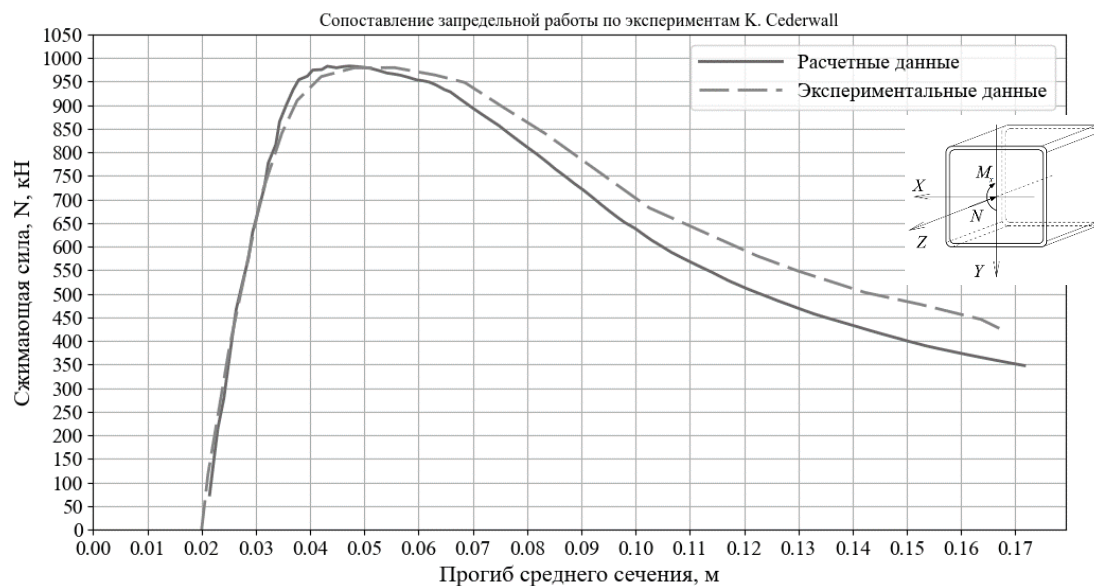


Рис. 10. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 4

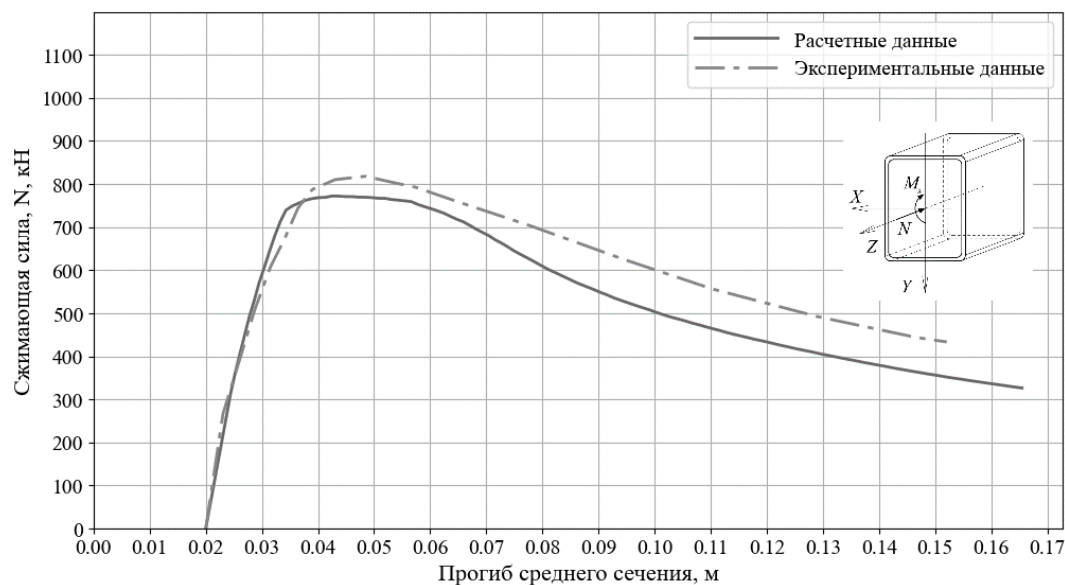


Рис. 11. График зависимости «прогиб-нагрузка» по работе K. Cederwall: стержень № 5

Выводы

1. Обратный численно-аналитический метод позволяет определить зависимость «прогиб-нагрузка» в предельной и запредельной стадиях работы при действии сжимающей силы с одноосным эксцентриситетом с хорошим уровнем сходимости с экспериментальными данными.

2. Необходимо использовать уточненные диаграммы деформирования бетона для более точного расчета ниспадающей кривой графиков зависимости «прогиб-нагрузка» и определения остаточной несущей способности.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев, А. А. Трубобетонные конструкции для возведения каркасных зданий / А. А. Афанасьев, А. В. Курочкин // *Строительные науки*. – 2016. – № 2. – С. 113–118.
2. Кибирева, Ю. А. Применение конструкций из сталежелезобетона / Ю. А. Кибирева, Н. С. Астафьева. – Текст : электронный // *Экология и строительство*. – 2018. – № 2. – С. 27–33. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-konstruktsiy-iz-stalezhelezobetona> (дата обращения: 03.05.2026).
3. Белый, Г. И. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом / Г. И. Белый, А. А. Ведерникова // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 2 (85). – С. 26–35.
4. Белый, Г. И. Обратный численно-аналитический метод расчета стержневых элементов ЛСТК / Г. И. Белый, М. О. Смирнов // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2021. – № 3. – С. 57–68.
5. Белый, Г. И. Запредельная несущая способность стержневых элементов стальных конструкций / Г. И. Белый, А. И. Гарипов // *Международный строительный конгресс. Наука. Инновации. Цели. Строительство : сборник тезисов докладов, Москва, 11–13 апреля 2023 года*. – Москва : Строительство, 2023. – С. 195–196. – DOI 10.37538/2949-219X-2023. – EDN LNHFRW.
6. Shakir-Khalil, H. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns / H. Shakir-Khalil, J. Zegniche // *The Structural Engineer*. – 1989. – Vol. 67, № 19/3. – P. 346–353.
7. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression / G. Muciaccia, F. Giussani, G. Rosati, F. Mola // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2011. – № 67. – P. 904–916.
8. Gourley, B. C. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete filled steel tube beam-column. Structural Engineering Report No. ST-01-4 / B. C. Gourley, C. Tort, J. F. Hajjar, P. H. Schiller ; Department of Civil Engineering, Institute of Technology University of Minnesota. – USA, 2001. – 269 c.
9. O'Shea, M. D. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes / M. D. O'Shea, R. Q. Bridge // *Journal of Structural Engineering*. – 2000. – Vol. 126, № 11. – P. 1295–1303.
10. Cederwall, K. High-strength concrete used in composite columns / K. Cederwall, B. Engstrom, M. Grauers // *ACI Symposium Publication*. – 1990. – № 121. – P. 195–214.
11. Liu, D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns / D. Liu // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2006. – № 62 – С. 839–846.

VEDERNIKOVA Alena Andreevna, candidate of technical sciences, acting head of the chair of information and mathematical modeling technologies

ULTIMATE AND UNDER ULTIMATE CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS DEFORMATION BEHAVIOR

St Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., St Petersburg, 190005, Russia.

Tel.: (904) 605-65-88; e-mail: alena@avedernikova.ru

Key words: concrete filled steel tube columns, CFST, inverse numerical-analytical method, HCFST.



The article presents the results of comparing experimental data of concrete filled steel tube columns made at different times with the results of calculation using the reverse numerical-analytical method. The data is provided for under ultimate and ultimate behavior in the form of graphs of structural deformation under load.

REFERENCES

1. Afanasev A. A., Kurochkin A. V. Trubobetonnye konstruksii dlya vozvedeniya karkasnykh zdaniy [Concrete filled steel tube structures for the construction of frame buildings]. *Stroitelnye nauki*, 2016, № 2, P. 113–118.
2. Kibireva Yu. A., Astafeva N. S. Primenenie konstruksiy iz stalezhelezobetona [The use of composite steel concrete structures]. *Ehkologiya i stroitelstvo*, 2018, № 2, P. 27–33. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenienie-konstruksiy-iz-stalezhelezobetona> (accessed: 03.05.2026).
3. Bely G. I., Vedernikova A. A. Issledovanie prochnosti i ustoychivosti trubobetonnykh ehlementov konstruksiy obratnym chislenno-analiticheskim metodom [Investigation of the strength and stability of concrete filled tube structural elements by the reverse numerical-analytical method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2021, № 2 (85), P. 26–35.
4. Bely G. I., Smirnov M. O. Obratny chislenno-analiticheskiy metod rascheta sterzhnevnykh elementov LSTK [Reverse numerical and analytical method for calculating LSTK core elements]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2021, № 3, P. 57–68.
5. Bely G. I., Garipov A. I. Zapredelnaya nesushchaya sposobnost sterzhnevnykh ehlementov stalnykh konstruksiy [Over-ultimate bearing capacity of core elements of steel structures]. *Mezhdunarodny stroitelny kongress. Nauka. Innovatsii. Tseli. Stroitelstvo: Sbornik tezisov dokladov*, 11–13 aprelya 2023 goda. Moscow, Stroitelstvo, 2023, P. 195–196.
6. Shakir-Khalil H., Zegniche J. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns. *The Structural Engineer*. 1989. Vol. 67. № 19/3. P. 346–353.
7. Muciaccia G., Giussani F., Rosati G., Mola F. Response of self-compacting concrete filled tubes under eccentric compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, № 67, P. 904–916.
8. Gourley B. C., Tort C., Hajjar J. F., Schiller P. H. A synopsis of studies of the monotonic and cyclic behavior of concrete filled steel tube beam-column. *Structural Engineering Report No. ST-01-4*. Department of Civil Engineering, Institute of Technology, University of Minnesota, USA, 2001, 269 p.
9. O'Shea M. D., Bridge R. Q. Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes. *Journal of Structural Engineering*. 2000, Vol. 126. № 11, P. 1295–1303.
10. Cederwall K., Engstrom B., Grauers M. High-strength concrete used in composite columns. *ACI Symposium Publication*, 1990, № 121, P. 195–214. <https://doi.org/10.14359/2838>.
11. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, № 62, P. 839–846.

© А. А. Ведерникова, 2026

Получено: 04.05.2026 г.