

Численные исследования трубобетонных элементов при внецентренном сжатии

А.А. Ведерникова

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный
университет*

Аннотация: Приводится пример расчета методом конечных элементов трубобетонных стержней с учетом их гибкости и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, расчетами по российским и европейским нормам и “обратным” численно-аналитическим методом, учитывающим фактическую жесткость стержней. Практическая польза статьи в том, что приведен пошаговый алгоритм расчета в конечно-элементном комплексе ANSYS, которым смогут пользоваться инженеры и исследователи. Сравнение с другими методами расчета дает возможность количественно и качественно сравнить точность предложенной конечноэлементной модели и “обратного” метода по сравнению с нормативными методиками расчета.

Ключевые слова: обратный численно-аналитический метод, трубобетонные стержни, расчет устойчивости, модель Друкера-Прагера.

Введение

Трубобетонные конструкции широко применяются в современном высотном строительстве [1] в качестве вертикальных элементов – колонн, пилонов. Стальная труба, в которую заключен бетон, работает как несъемная опалубка и как внешняя арматура, в некоторых случаях обеспечивающая прирост несущей способности за счет эффекта обжатия. Аналитический расчет таких элементов предложен в российских (СП 266.1325800.2016. Конструкции железобетонные. Правила проектирования. М. Минстрой России. 2016. 132 с.) и зарубежных нормах (ТКП EN 1994-1-1-2009 (02250). Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Минск. Минстрой архитектуры. 2010. 107 с.). Численные расчеты, как правило, не описаны в нормах, а практических примеров расчета приводится не слишком много. Данная статья восполняет этот пробел и описывает практический подход к расчету

трубобетонных элементов в программе *ANSYS*. Приведенный пример расчета смогут применять инженеры и другие исследователи на практике.

Численные исследования трубобетонных конструкций проводились многими исследователями, наиболее современными из которых являются работы E. Ellobody [2], G.D. Hatzigeorgiou [3], H. Hua и др. [4], Md. M. Islam [5], М.И. Гаранжа [6]. В этих работах приводятся подробные описания применяемых моделей материалов, однако многие вопросы, такие, как выбор той или иной точности модели, способ нагружения, переход от теории к практике остаются «за кадром».

В данной статье проводится решение задачи с использованием программы *ANSYS Workbench* 18.0. Для подтверждения выбранной конечноэлементной (далее КЭ) модели производилось сравнение с экспериментальными данными, полученными при испытании трубобетонных образцов, выполненных H. Shakir-Khalil и J. Zegniche [7], K. Cederwall и др. [8], P.H. Shiller и J.F. Hajjar [9], H. Shakir-Khalil и M. Mouli [10]. Верифицированные таким образом модели можно применять для проверки численно-аналитического метода расчета при схемах загрузки, для которых экспериментов не проводилось. Сравнение с нормативными методиками СП 266 и Еврокодом 4 дает представление о точности расчета с использованием рассматриваемой КЭ модели. Приведенные результаты расчета «обратным» методом [11, 12] показывают его точность в сравнении с нормативными и численными методами.

Модели материалов

В исследованиях [13, 14] производится анализ модели Друкера-Прагера, при котором она признается подходящей для расчета трубобетонных колонн. В данной работе для моделирования бетона используется комбинация *Druker-Prager Concrete* и *Multilinear Isotropic*

Hardening по рекомендации [15, 16]. Описание модели происходит при помощи трех параметров, указанных в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные характеристики бетона

Начальный модуль упругости бетона	Коэффициент Пуассона	Прочность бетона при одноосном сжатии	Прочность бетона при растяжении	Прочность бетона при двухосном сжатии
E_b	ν	R_b	R_{bt}	От R_b до $1,41 R_b$ [Ошибка! Источник ссылки не найден.5]

Классическая модель Друкера-Прагера [17] применима к зернистому материалу, такому, как бетон, однако, если в стержне будут значительные прогибы, могут возникнуть проблемы сходимости решения. Multilinear Isotropic Hardening улучшит сходимость расчета (см. рис. 2). Такая модель работы наиболее соответствует работе бетона из предлагаемых в ANSYS.

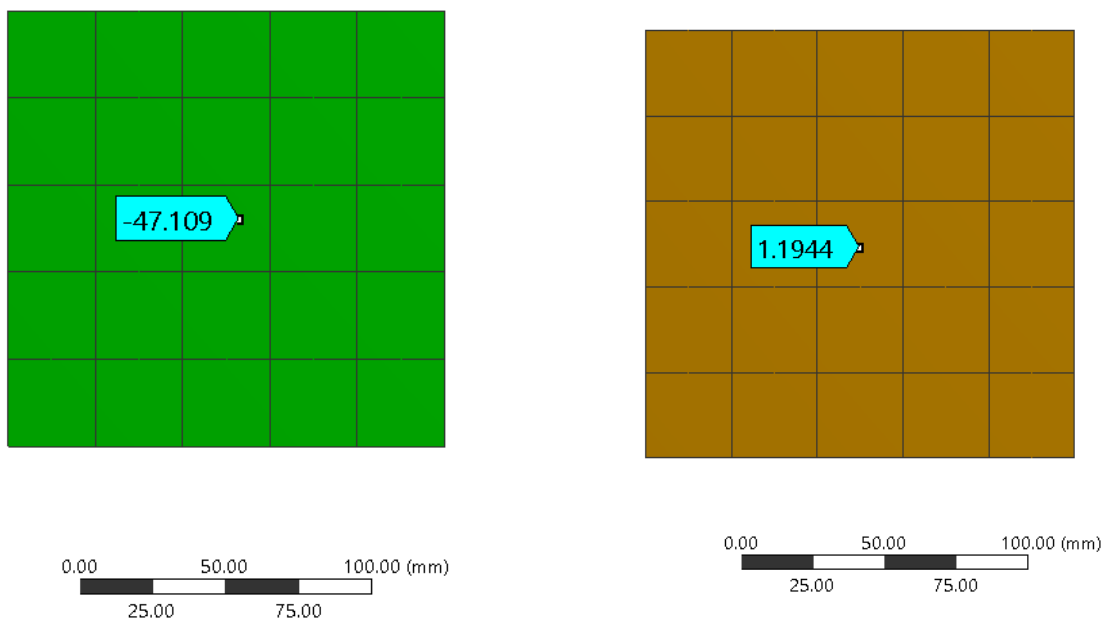


Рис. 1. а) испытание призмы на сжатие при $R_b = 47$ МПа; б) испытание призмы на растяжение при $R_{bt} = 1,2$ МПа

Для верификации модели бетона были созданы призмы 150x150x600 мм, которые подвергались, растяжению и сжатию в программе ANSYS. На рис. 1 а, б приведена призма, с картами распределения напряжений в среднем сечении в момент, соответствующий предельным деформациям бетона на растяжение и сжатие. Для стали применяется модель Multilinear Isotropic Hardening, диаграмма на рис. 3. Если авторы экспериментов приводили свои диаграммы для стали по результатам испытаний, то принимались эти диаграммы.

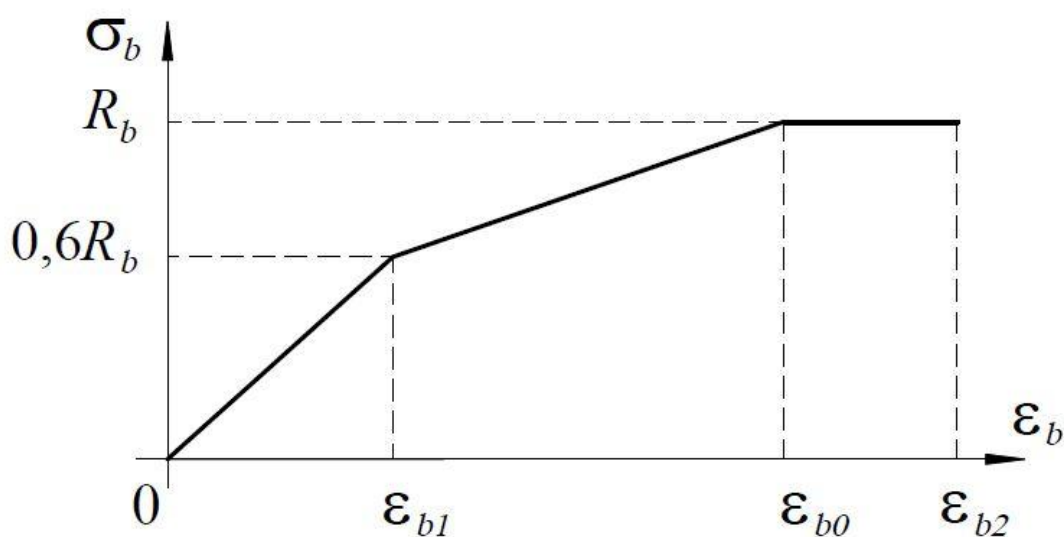


Рис. 2 – Диаграмма бетона

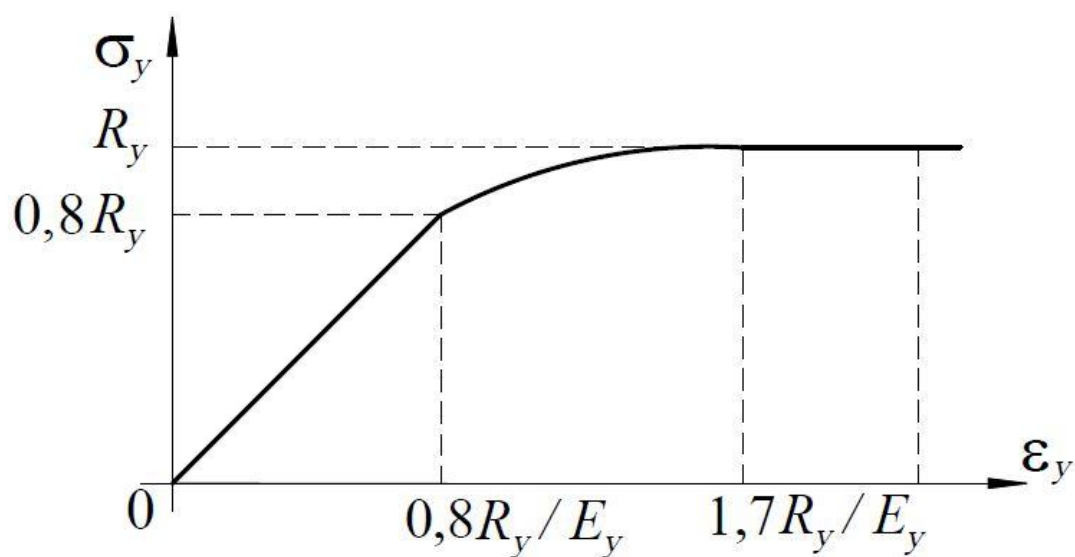


Рисунок 3 – Диаграмма стали

Типы конечных элементов

В случае работы бетона в условиях трехосного сжатия, а также при статической работе трубобетонных стержней учет раскрытия трещин в бетоне становится не столь актуальным, так как, по мнению многих исследователей, бетон в трубе приобретает свойства псевдопластичности [18]. Основное преимущество широко известного *solid65* – расчет трещин, в данной задаче теряет свою необходимость, т.к. при обжатии бетон работает как упругопластический материал, а образованием микротрещин можно пренебречь. [19]. Таким образом, для расчетов был принят *solid185* – восьмиузловой конечный элемент, способный на упругопластические деформации.

Стальная труба имеет небольшую толщину относительно образца. Примем, что по толщине трубы изменение напряжений незначительно, тогда для ускорения расчета ее можно задать оболочечным элементом.

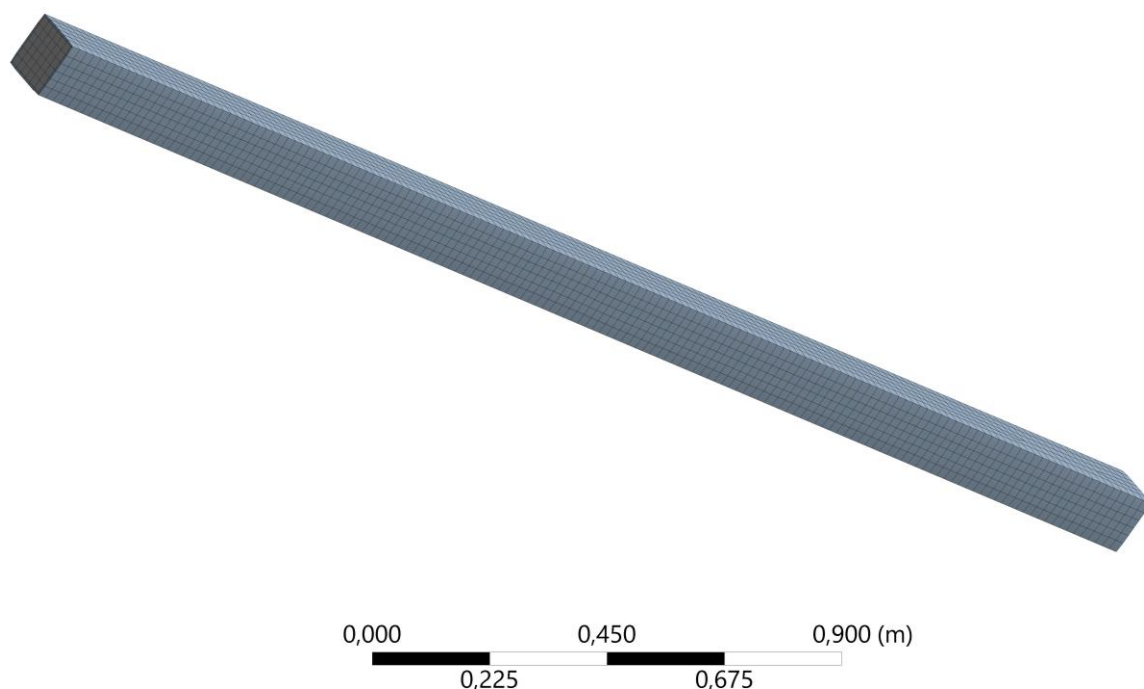


Рисунок 4. – КЭ модель трубобетонной колонны

На рис. 4 показана компьютерная модель образца. При создании расчетной модели использовались конечные элементы: *SOLID185* – для бетона, *SHELL* – для трубы, для контактной пары применялись элементы *CONTA174* (бетон), *TARGE170* (сталь).

Граничные условия, способ нагружения

В расчетной схеме обеспечивается шарнирное опирание торцов, заданных через *Remote Displacement*, наложенное на верхнюю и нижнюю грани образца. Важно убедиться, что элементу запрещено кручение, так как при нашем типе нагружения оно не будет значительным, но его наличие может приводить к «расхождению» решения.

Для моделирования поверхностного контакта была использована опция *General Contact*. Рассматривались три вероятных варианта взаимодействия бетона и трубы: нулевое трение (бетон свободно перемещается относительно трубы, есть связь только по торцам), полное сцепление (бетон и труба не

смещаются относительно друг друга), сцепление с коэффициентом трения 0,47 (коэффициент трения между бетоном и сталью). При аналитических расчетах наиболее часто встречается принятая гипотеза о несмещаемости трубы относительно бетона. В работах *Y. Hunaiti* [20] экспериментально подтверждено, что совместная работа бетона с трубой обеспечена, если они соединены по концам и нагрузка приложена одновременно на стальную и бетонную части. Автором был выбран вариант несмещающихся относительно друг друга трубы и бетона («bonded»), нагружение было приложено на бетонную и стальную части.

Нагружение моделировалось заданием пошагового перемещения. Такой подход позволяет также улучшить сходимость решения. Для лучшей сходимости были настроены параметры *Step Controls*, максимальное количество шагов было увеличено до 1000. Несущая способность определялась по внутренним усилиям в стержне.

Современные расчеты предполагают учет физической и геометрической нелинейности. Обычно для решения таких нелинейных уравнений используется решение методом Ньютона-Рафсона, который подробно описан в [16] и реализован в ANSYS. Решатель программного комплекса был настроен на несимметричный метод Ньютона-Рафсона. Оценка сходимости шага была назначена в 0,5%.

Сравнение с экспериментальными данными, численно-аналитическим расчетом и расчетом по СП 266 и Еврокоду 4

Экспериментальные данные, выбранные из зарубежных источников, соответствуют КЭ моделям по типу загрузки: нагрузка прикладывалась в них одновременно на сталь и на бетон.

Численно-аналитический «обратный» метод подробно приводится в [12, 13]. Его особенность в том, что он позволяет определять фактическую

жесткость стержня, а не пользоваться более усредненной величиной, которая берется в нормах.

Расчет по СП 266 проводился по недеформированной схеме, с учетом увеличения эксцентриситета при помощи коэффициента по п. 7.2.2.1 - 7.2.2.10. При двухосном эксцентриситете расчет производился по указаниям п. 7.1.2 с учетом формул 7.3 и 7.4 (упрощенный метод).

Расчет по Еврокоду 4 производился по п. 6.7.3. Начальные несовершенства и ползучесть бетона в расчет не брались, так как образцы не имели погибей, были точно установлены в испытательные стенды и были испытаны на кратковременное нагружение.

Результаты расчетов и сравнение приведены в табл. 2. Жирным шрифтом в таблице выделено значение, наиболее близкое к экспериментальному результату. Цифры в скобках в таблице даны для соотнесения с рисунками 5–8, которые наглядно демонстрируют сравнение точности результатов расчета.

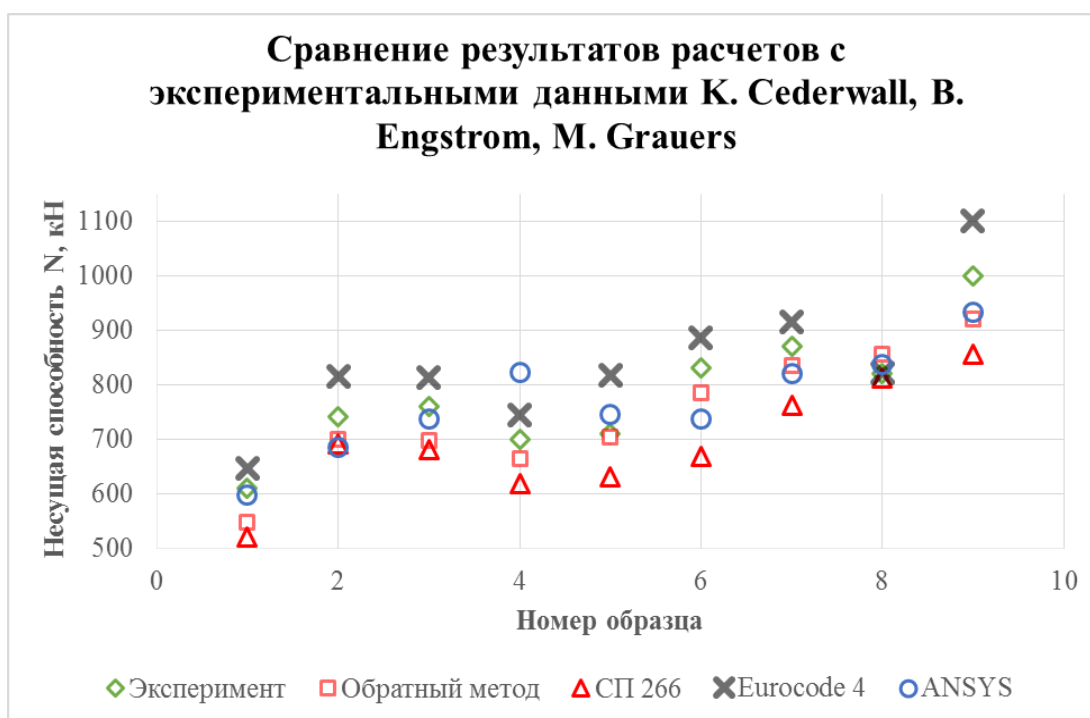


Рис. 5. – Сравнение результатов расчетов и экспериментов по [8]

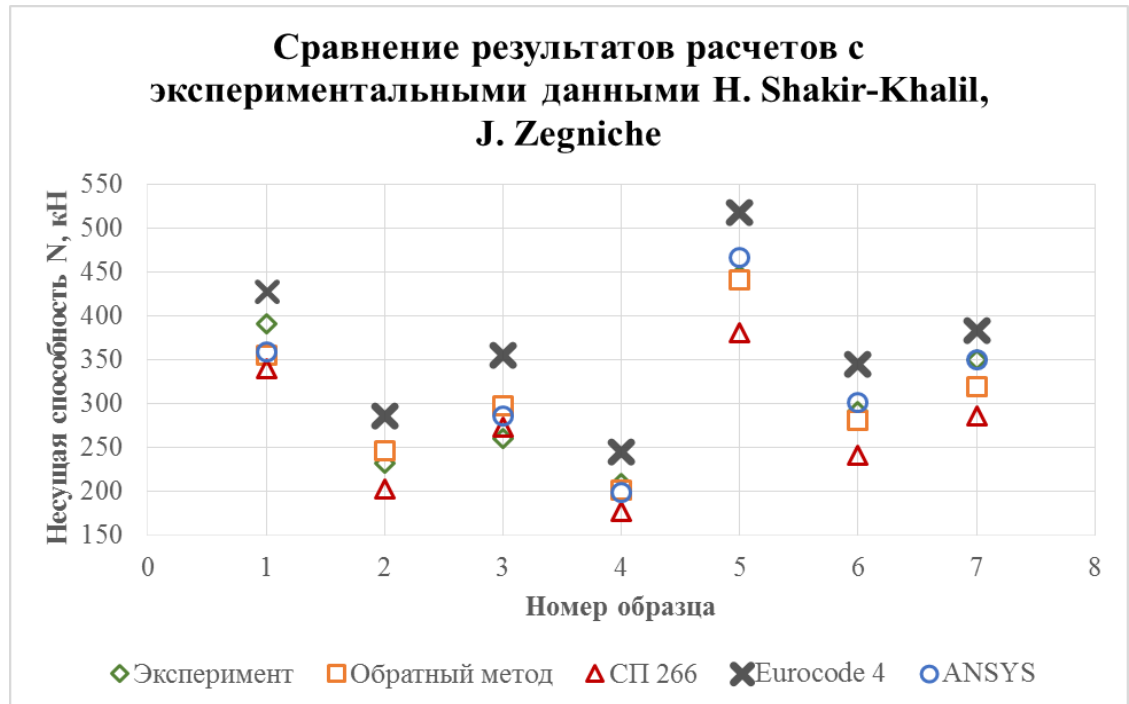


Рис. 6. – Сравнение результатов расчетов и экспериментов по [7]

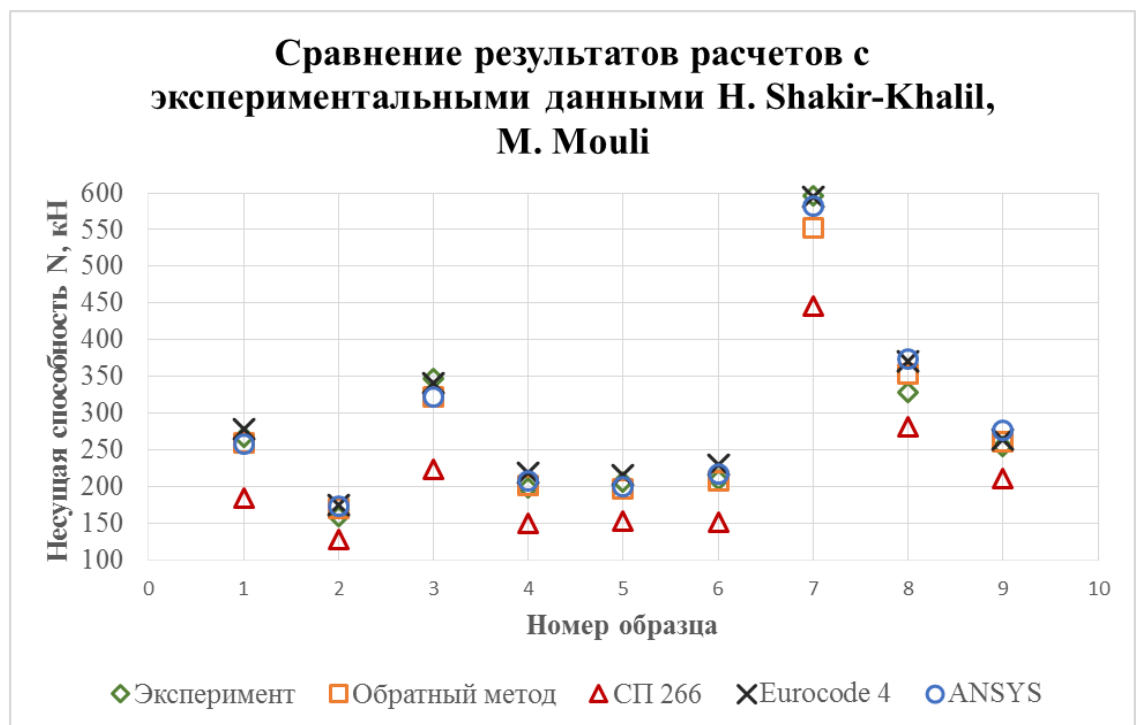


Рис. 7. – Сравнение результатов расчетов и экспериментов по [10]

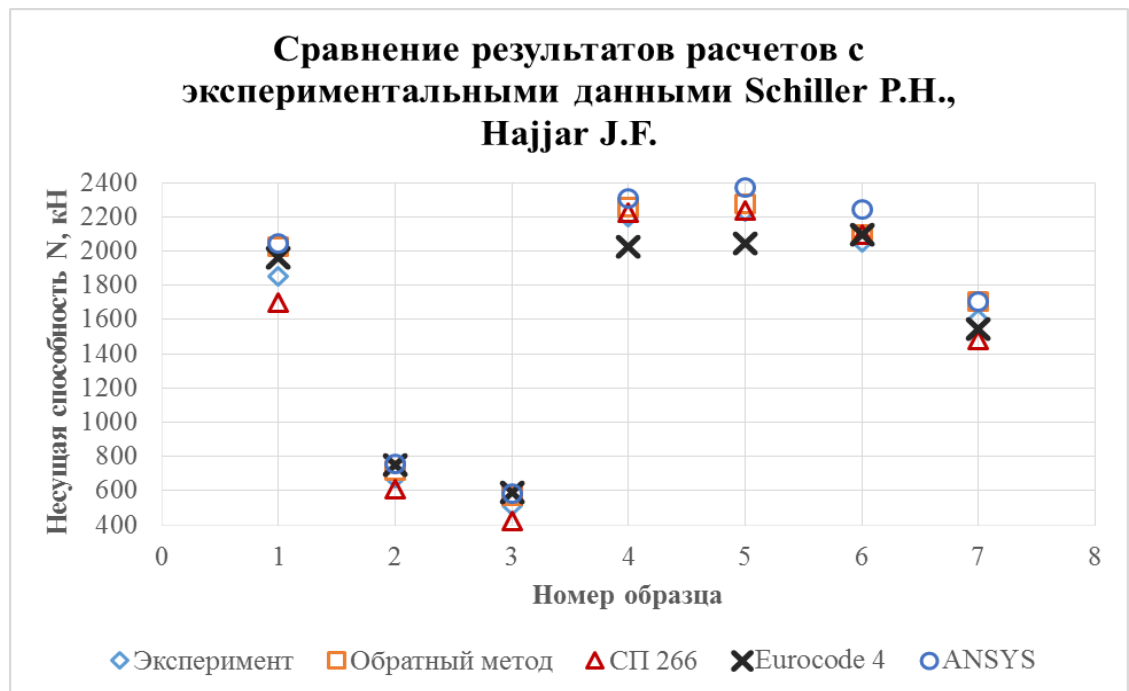


Рис. 8. – Сравнение результатов расчетов и экспериментов по [9]

Таблица 2 – Сравнение трубобетонных элементов прямоугольного сечения по [7 – 10]

№ стержня	N_s , кН	N , кН, обр. метод	$N_{СП}$, кН, СП 266	$N_{Ес}$, кН Еврокод 4	N_{ans} , кН, ANSYS	Сравнение, %, между N_s и N	Сравнение, %, между N_s и $N_{СП}$	Сравнение, %, между N_s и $N_{Ес}$	Сравнение, %, между N_s и N_{ans}
<i>K. Cederwall, B. Engstrom, M. Grauers [8]</i>									
1	610	547	519	646	596.2	-10.33%	-14.92%	5.90%	-2.26%
2	740	698.1	690	815	683.5	-5.66%	-6.76%	10.14%	-7.64%
3	760	697.8	681	812	736	-8.18%	-10.39%	6.84%	-3.16%
4	700	664.1	618	744	822.8	-5.13%	-11.71%	6.29%	17.54%
5	710	703	631	817	744.3	-0.99%	-11.13%	15.07%	4.83%
6	830	784	667	885	737.1	-5.54%	-19.64%	6.63%	-11.19%
7	870	833.5	762	915	819.2	-4.20%	-12.41%	5.17%	-5.84%
8	820	855.2	812	820	836.2	4.29%	-0.98%	0.00%	1.98%
9	1000	919.4	855	1100	933.2	-8.06%	-14.50%	10.00%	-6.68%
<i>H. Shakir-Khalil, J. Zegniche [7]</i>									
1	390	354.9	339	427	358.8	-9.00%	-13.08%	9.49%	-8.00%
2	232	245	202	285	242.1	5.60%	-12.93%	22.84%	4.35%
3	260	296.4	272	354	285.8	14.00%	4.62%	36.15%	9.92%
4	208	200.2	176	244	197.8	-3.75%	-15.38%	17.31%	-4.90%
5	445	439.9	380	517	466.6	-1.15%	-14.61%	16.18%	4.85%
6	290	280.7	241	344	301	-3.21%	-16.90%	18.62%	3.79%
7	350	318.4	285	383	350	-9.03%	-18.57%	9.43%	0.00%
<i>H. Shakir-Khalil, M. Mouli [10]</i>									
Z-6 (1)	268	259.2	184.6	279	258.3	-3.28%	-31.12%	4.10%	-3.62%
Z-7 (2)	160	170.1	129	176	173.5	6.31%	-19.38%	10.00%	8.44%
M-2 (3)	348	322.2	223.7	342	322.9	-7.41%	-35.72%	-1.72%	-7.21%
M-3 (4)	198.5	202.6	150.1	219	207.6	2.07%	-24.38%	10.33%	4.58%
M-4 (5)	206.8	196.7	153.9	216	199.8	-4.88%	-25.58%	4.45%	-3.38%
M-5 (6)	209.8	208.6	151.4	229.5	217.9	-0.57%	-27.84%	9.39%	3.86%
M-7 (7)	596.2	552.8	446.5	595	582.1	-7.28%	-25.11%	-0.20%	-2.36%
M-8 (8)	329.2	354.5	282.5	371.5	374.5	7.69%	-14.19%	12.85%	13.76%
M-9 (9)	254.6	260.8	212.2	264.5	277.7	2.44%	-16.65%	3.89%	9.07%
<i>Schiller P.H., Hajjar J.F. [9]</i>									
SHC-1 (1)	1850	2022.8	1696	1964	2041.9	9.34%	-8.32%	6.16%	10.37%
SHC-7 (2)	675	717	611	751	752.9	6.22%	-9.48%	11.26%	11.54%
SHC-8 (3)	515	567.9	422	590	585.2	10.27%	-18.06%	14.56%	13.63%
<i>Schiller P.H., Hajjar J.F. [9]</i>									
SHC-3 (4)	2200	2255	2225	2025.5	2305.8	2.50%	1.14%	-7.93%	4.81%
SHC-4 (5)	2230	2277.3	2237.3	2044.5	2374.4	2.12%	0.33%	-8.32%	6.48%
SHC-5 (6)	2050	2097.4	2098.3	2095	2245.8	2.31%	2.36%	2.20%	9.55%
SHC-6 (7)	1600	1706	1480	1545	1705.8	6.63%	-7.50%	-3.44%	6.61%

Выводы

Как следует из данных табл. 2 и рис. 5–8, удовлетворительная сходимость наблюдается между экспериментальными данными и КЭ моделью (0...14%). Расхождение между КЭ моделью и предложенным «обратным» методом расчета составляет в большинстве случаев менее 5%, расхождение между экспериментом и «обратным» методом в 66% случаев являлось самым наименьшим среди результатов расчетов различными методами и не превышало 10%. Расхождение между экспериментами и расчетами по нормам значительнее, при этом расчет по СП 266, как правило, показывал значения несколько ниже экспериментальных (-0,98...-18,57 % при нагружении с одноосным эксцентриситетом), расчет по Еврокоду 4 показывал значения выше (0...18%). При нагружении силой с двухосным эксцентриситетом результаты расчета по упрощенному методу СП 266 показали низкую сходимость при расчете гибких стержней, несущая способность оказалась занижена до 35%. При расчете коротких стержней СП266 показал хорошую сходимость (в основном, не более 9%). Такое расхождение, вероятно, наблюдается потому, что, хотя расчеты по Европейским и Российским нормам во многом похожи, СП266 задает меньшую жесткость стержней при расчете коэффициента, учитывающего явления второго порядка.

В результате получены КЭ модели, которые обладают хорошей сходимостью с экспериментальными данными и подробно описаны. Следовательно, положения данной статьи могут быть использованы другими исследователями и инженерами, а также автором для совершенствования «обратного» метода расчета.

Результаты численно-аналитических и аналитических расчетов показывают, что учет фактической жесткости стержней в «обратном» методе дает более точные результаты.

Литература

1. Афанасьев А.А., Курочкин А.В. Трубобетонные конструкции для возведения каркасных зданий // Строительные науки. 2016. №2. С. 113-118.
 2. Ellobody, E. Numerical modelling of fibre reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns. *Thin-Walled Structures*. 2013. No. 63. Pp. 1-12.
 3. Hatzigeorgiou G.D. Numerical model for the behavior and capacity of circular CFT columns, Part II: Verification and extension. *Engineering Structures*. 2008. No. 30. Pp. 1579-1589.
 4. Hua H., Huang C., Chen Z. Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination. *Journal of Constructional Steel Research*. 2005. No. 61. Pp. 1692-1712.
 5. Islam Md. M. Finite element analysis of steel fiber reinforced concrete (SFRC): validation of experimental shear capacities of beams. *Procedia Engineering*. 2014. No. 90. Pp. 89-95.
 6. Гаранжа И.М. Обзор научных исследований в области изучения напряженно-деформированного состояния трубобетонных конструкций // *Металлические конструкции*. 2015. №3 (21). С. 199-133.
 7. Shakir-Khalil H., Zegnicher J. Experimental behavior of concrete-filled rolled rectangular hollow-section columns. *The Structural Engineer*. 1989. No. 67(19/3). Pp. 346-353.
 8. Cederwall K., Engstrom B., Grauers M. High-strength concrete used in composite columns. *ACI Symposium Publication*. Hester W.D. 1990. No. 121. Pp. 195–214.
 9. Schiller P. H., Hajjar J. F. A Distributed Plasticity Formulation for Three-Dimensional Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns and Composite Frames. *Structural Engineering Report No. ST-96-5*. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota. November 1996. 223 p.
-

10. Shakir-Khalil H., Mouli M. Further tests on concrete-filled rectangular hollow-section columns. *The Structural Engineer*. 1990. No. 68 (20/16). Pp. 405-413.
 11. Белый Г. И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 6 (83). С. 46–55.
 12. Белый Г. И., Ведерникова А.А. Исследование прочности и устойчивости трубобетонных элементов конструкций обратным численно-аналитическим методом // *Вестник гражданских инженеров*. 2021. № 2 (85). С. 26-35.
 13. Bao J.Q. A new deneralized Drucker-Prager flow rule for concrete under compression. *Engineering Structures*. 2013. No. 56. Pp. 2076-2082.
 14. Jiang J.-F., Wu Y.-F. Identification of material parameters for Drucker-Prager plasticity model FRP confined circular concrete columns. *International Journal of Solids and Structures*. 2012. No. 49. Pp. 445-456.
 15. Клованич С.Ф., Малышко Л. Нелинейные модели материалов в строительной механике. Одесса. ОНМУ. 2017. 125 с.
 16. ANSYS Mechanical APDL Material Reference. Canonsburg, PA, USA. 2013. Date views 08.11/2022. URL: [dokumen.tips/documents/ansys-mechanical-apdl-material-reference-r15.html?page=1](https://www.dokumen.tips/documents/ansys-mechanical-apdl-material-reference-r15.html?page=1).
 17. Wang X., Liu J. Zhou X. Behaviour and design method of short square tubed-steel-reinforced-concrete columns under eccentric loading. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. No. 116. Pp. 193-203.
 18. Gourley B. C., Tort C., Hajjar J.F., Shiller 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.
-

19. Лукша Л.К. Исследование прочности и пластичности бетона в условиях стесненной поперечной деформации: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Минск. 1962. 21 с.

20. Hunaiti Y., Wakabayashi M., Masuo K. Experimental Evaluation of the Effect of Bond on the Maximum Capacity of Composite Columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 1992. No. 22. Pp. 39-55.

References

1. Afanas'yev A.A., Kurochkin A.V. *Stroitel'nyye nauki*. 2016. No. 2. Pp. 113-118.
2. Ellobody, E. *Thin-Walled Structures*. 2013. No. 63. Pp. 1-12.
3. Hatzigeorgiou G.D. *Engineering Structures*. 2008. No. 30. Pp. 1579-1589.
4. Hua H., Huang C., Chen Z. *Journal of Constructional Steel Research*. 2005. No. 61. Pp. 1692-1712.
5. Islam Md. M. *Procedia Engineering*. 2014. No. 90. Pp. 89-95.
6. Garanzha I.M. *Metallicheskiye konstruktsii*. 2015. No. 3 (21). Pp. 199-133.
7. Shakir-Khalil H., Zegniche J. *The Structural Engineer*. 1989. No. 67(19/3). Pp. 346-353.
8. Cederwall K., Engstrom B., Grauers M. *ACI Symposium Publication*. Hester W.D. 1990. No. 121. Pp. 195–214.
9. Schiller P. H., Hajjar J. F. A Distributed Plasticity Formulation for Three-Dimensional Rectangular Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns and Composite Frames. *Structural Engineering Report No. ST-96-5*. Department of Civil Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota. November 1996. 223 p.
10. Shakir-Khalil H., Mouli M. *The Structural Engineer*. 1990. No. 68 (20/16). Pp. 405-413.
11. Gourley B. C., Tort C., Hajjar J.F., Shiller 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.

12. Belyy G. I. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2020. No. 6 (83). Pp. 46–55.

13. Belyy G. I., Vedernikova A.A. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. No. 2 (85). Pp. 26-35.

14. Bao J.Q. Engineering Structures. 2013. No. 56. Pp. 2076-2082.

15. Jiang J.-F., Wu Y.-F. International Journal of Solids and Structures. 2012. No. 49. Pp. 445-456.

16. Klovanich S.F., Malyshko L. Nelineynyye modeli materialov v stroitel'noy mekhanike [Nonlinear models of materials in structural mechanics]. Odessa. ONMU. 2017. 125 p.

17. ANSYS Mechanical APDL Material Reference. Canonsburg, PA, USA. 2013. Date views 08.11/2022. URL: dokumen.tips/documents/ansys-mechanical-apdl-material-reference-r15.html?page=1.

18. Wang X., Liu J., Zhou X. Journal of Constructional Steel Research. 2016. No. 116. Pp. 193-203.

19. Luksha L.K. Issledovaniye prochnosti i plastichnosti betona v usloviyakh stesnennoy poperechnoy deformatsii [Study of the strength and plasticity of concrete under conditions of constrained transverse deformation]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Minsk. 1962. 21 p.

20. Hunaiti Y., Wakabayashi M., Masuo K. Journal of Constructional Steel Research. 1992. No. 22. Pp. 39-55.