

Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение

А.А. Ведерникова

Санкт-петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург

Аннотация: В статье рассматривается способ учета обжатия бетона по нормативным формулам при расчете обратным численно-аналитическим методом, учитывающим фактическую жесткость трубобетонных стержней. Обратный численно-аналитический метод позволяет производить расчет трубобетонных стержней на прочность и устойчивость при внецентренном сжатии. Приводятся зависимости, показывающие возможность учета обжатия при различных концевых эксцентриситетах и гибкостях.

Ключевые слова: трубобетон, обратный численно-аналитический метод, нелинейная деформационная модель, обжатие бетона, трубобетонная колонна, внецентренное сжатие.

Введение

1. Эффективность трубобетонных конструкций особенно показательна при их использовании в условиях полного сжатия бетона по сечению (при малом эксцентриситете) [1, 2]. В коротких трубобетонных стержнях для этого достаточно, чтобы концевой эксцентриситет был достаточно мал. Например, по СП 266 (СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Минстрой России. URL: minstroyrf.gov.ru/docs/13674/ (дата обращения: 01.11.2023) малым будет считаться эксцентриситет e , не превышающий 0,133 диаметра бетонной части, в Еврокод 4 (ТКП EN 1994-1-1-2009 (02250). Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. Минск. 2010. 107 с.) – 0,1 наружного диаметра трубы D_p . В гибких стержнях данное соотношение должно быть справедливо, как правило, для среднего по длине сечения, где наблюдается горизонтальное смещение стержня, и к начальному эксцентриситету добавляется прогиб. В данной статье показано, каким образом применяются формулы расчета прочности на сжатие для стали и бетона при расчете обратным численно-

аналитическим методом. Идеи, изложенные в этой статье, будут полезны расчетчикам, использующим и нелинейно-деформационную модель при расчетах трубобетона.

Расчетные формулы

Решение с применением нелинейной деформационной модели рассмотрено в работах [3-5]. В [3, 5] объемная работа бетона учитывается методами механики железобетона, основанными на работах Н.И. Карпенко[6]. Обратный численно-аналитический метод [7] отличается от расчетов по нелинейной деформационной модели более высокой скоростью расчета и простотой и разрабатывается в соответствии с действующими строительными правилами, поэтому применение формул по нормам кажется актуальным.

Согласно СП 266 расчетное сопротивление металла трубы на сжатие R_{pc} понижается при полном сжатии бетонной части:

$$R_{pc} = R_y - \frac{1}{4} R_y \left(1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \right), \quad (1)$$

где

$$1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \geq 0. \quad (1a)$$

R_y – расчетное сопротивление стали, t_p – толщина стенки трубы.

В то же время прочность бетона на сжатие R_{bp} возрастает:

$$R_{bp} = R_b + \Delta R_b \left(1 - \frac{7,5e}{D_p - 2t_p} \right), \quad (2)$$

$$\Delta R_b = R_b \left(2 + 2,52 \cdot e^{-\frac{1}{c}(R_p A_p + R_b A_b)} \right) \frac{t_p}{D_p - 2t_p} \cdot \frac{R_p}{R_b}. \quad (3)$$

R_b – призмная прочность бетона на сжатие, R_p – прочность стали трубы на растяжение, A_p – площадь стали, A_b – площадь бетона, $c = 25$ МН при измерении величин в МПа и м.

Характеристики материалов для исследования

Нормативные документы разрешают применять обыкновенные тяжелые бетоны по СП 63.13330.2012 (СП 63.13330.2018 «СНиП 52-01-2003 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». Минстрой России. URL: minstroyrf.gov.ru/docs/18227/ (дата обращения: 01.11.2023)) в диапазоне от В3,5 до В100. Применять бетоны малой прочности не имеет большого смысла, так как большую нагрузку в этом случае, очевидно, будет брать на себя стальная часть элемента. Исследования показывают, что эффективны бетоны класса В35 и выше [8-10]. В [11] приведены примеры использования бетона прочностью от 30 МПа на практике. Поэтому для исследования примем последовательность от В35 до В100, а также высокопрочные бетоны В110 – В150 (СП 311.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования». Минстрой России. URL: minstroyrf.gov.ru/docs/16231/ (дата обращения: 01.11.2023)).

Для бетонов принимаем трехлинейную диаграмму, учитывая, что для класса по прочности на сжатие В60 и ниже предельная относительная деформация $\varepsilon_{b2} = 0,0035$, для высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие В70—В100 ε_{b2} принимают по линейному закону от 0,0033 при В70 до 0,0028 при В100 (см. СП 311.1325800.2017).

Стали принимаются по СП 16.13330.2020 (СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции». Минстрой России. URL: minstroyrf.gov.ru/docs/14474/ (дата обращения: 01.11.2023)) в диапазоне от С255 до С650.

Отношение параметра t_p к D_p по нормам лежит в диапазоне от 0,0064 до 0,046. Расчет будем производить для дискретных значений 0,0064; 0,0163; 0,0262; 0,0361; 0,046, расположенных через равные промежутки.

Рассматривались гибкости стержней от 0,5 до 4. Гибкость трубобетонного элемента рассчитывалась по формуле:

$$\bar{\lambda} = L_0 \sqrt{\frac{A_{red} R_y}{J_{red} E_y}}. \quad (4)$$

A_{red} – площадь сечения, приведенная к стали, J_{red} – момент инерции сечения, E_y – модуль упругости стали, L_0 – расчетная длина. Учитывалась полная жесткость элемента, без понижающих коэффициентов.

Алгоритм учета обжатия при расчете обратным численно-аналитическим методом

В [7] кратко описан пример расчета численно-аналитическим методом. Метод реализован на языке *python* и опубликован в [12, 13]. Представим данный расчет в виде блок-схемы (рис. 1).

В качестве исходных данных вводятся характеристики сечения труб, длина, начальные характеристики материалов и изначальный концевой эксцентриситет e_0 , при котором проверяется прочность.

Для того, чтобы определить несущую способность N в виде фактического параметра загрузки $\varphi_{eff} = \frac{N}{A_{red} \cdot R_y}$, рассматривается диапазон относительных предельных деформаций ε_{lim} , который назначается в диапазоне от 0,7 до 4 [14]. Максимальное значение фактического параметра загрузки из перечня параметров, соответствующих разным значениям предельных деформаций, будет соответствовать несущей способности стержня.

Анализируя блок-схему, можно прийти к выводу, что пока не известен деформационный эксцентриситет, не получится построить диаграммы работы материалов и по ним вычислить деформации. Обратный метод

расчета устроен так, что деформационный эксцентриситет задается перед основным расчетом, что позволяет по нему определить новую прочность материалов на сжатие. Если при данном деформационном эксцентриситете вычисленный концевой эксцентриситет $e_{0,eff}$ не равен изначальному, то расчет повторяется уже при новом деформационном эксцентриситете и прочности пересчитываются по формулам (1) и (2). Если концевой эксцентриситет $e_{0,eff}$ равен e_0 , то полученная несущая способность запоминается программой и расчет производится для следующего значения ε_{lim} . Когда весь диапазон ε_{lim} перебран, максимальное значение несущей способности записывается в результат работы программы и является несущей способностью трубобетонного стержня.

Кривые относительных концевых эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона трубой, полученные обратным численно-аналитическим методом

Для данного расчета приведенный алгоритм был откорректирован и деформационный эксцентриситет был назначен из формулы (1а). Были рассмотрены различные прочностные стали и бетона, однако фактором, наиболее сказывающимся на положении кривой, оказались соотношение толщины стенки t_p и диаметра трубы D_p и гибкость стержней (рис. 2-7). Заметно, что с ростом отношения t_p / D_p увеличивается и переходный эксцентриситет между обжатым и не обжатым бетоном. С ростом гибкости стержня уменьшается концевой эксцентриситет m_x , при котором сохраняется обжатие. Это качественный показатель верного применения обратного метода для расчётов трубобетонных стержней при малых эксцентриситет. И по данным графикам возможно определить, при каких значениях концевых

эксцентриситетов и гибкости эффект обжатия можно использовать для повышения несущей способности трубобетона.

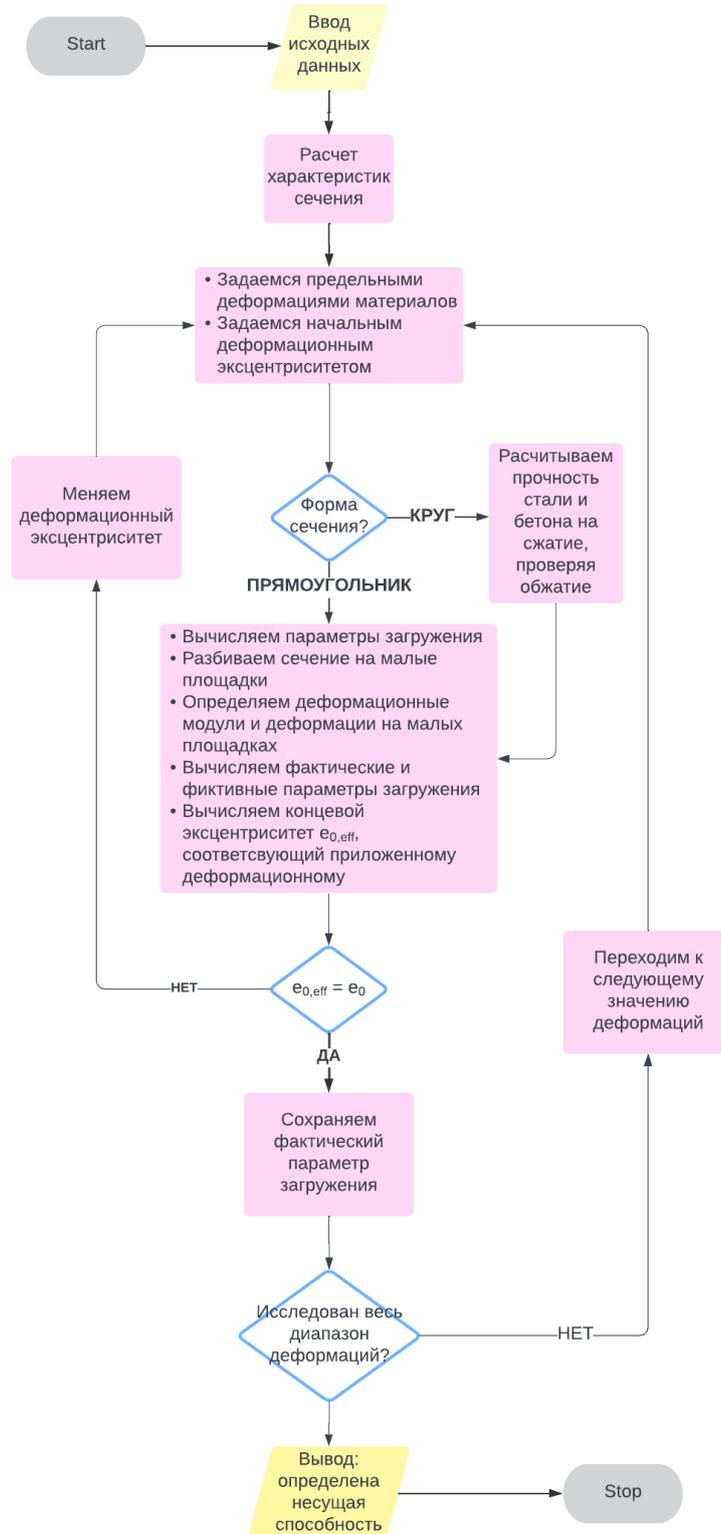


Рис. 1. – Алгоритм расчета несущей способности трубобетонного стержня при сжатии с концевым эксцентриситетом e_0

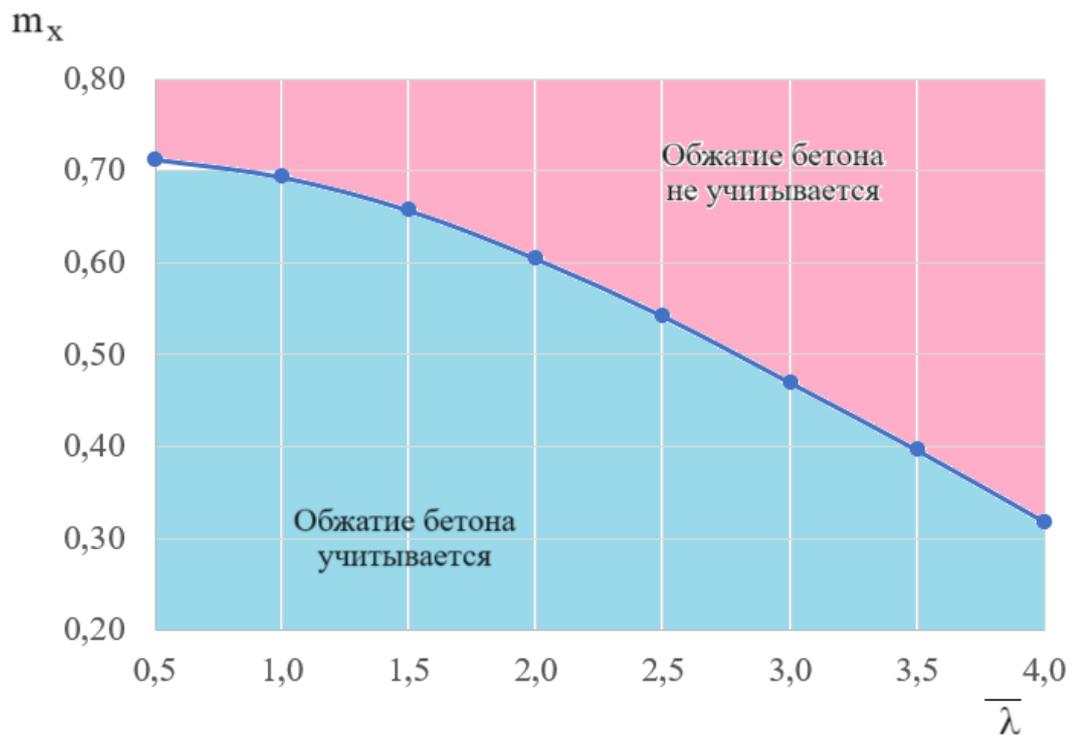


Рис. 2. – Зависимость относительных эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона, от относительной гибкости при $t_p/D_p = 0,046$.

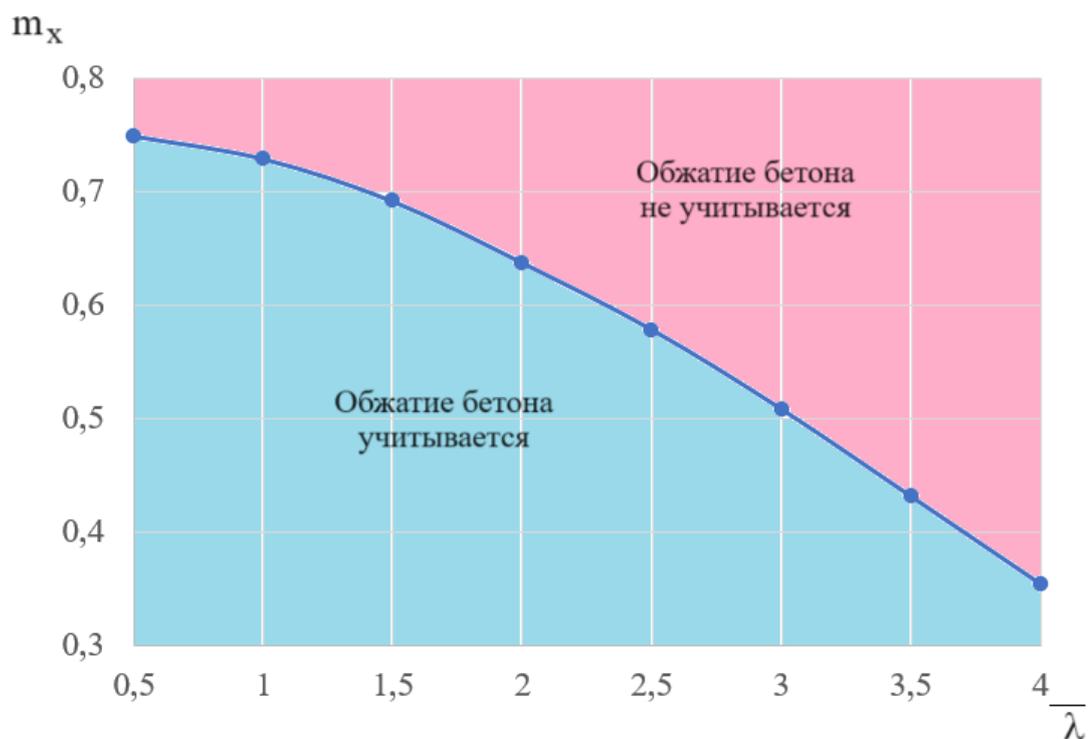


Рис. 3. – Зависимость относительных эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона, от относительной гибкости при $t_p/D_p = 0,0361$.

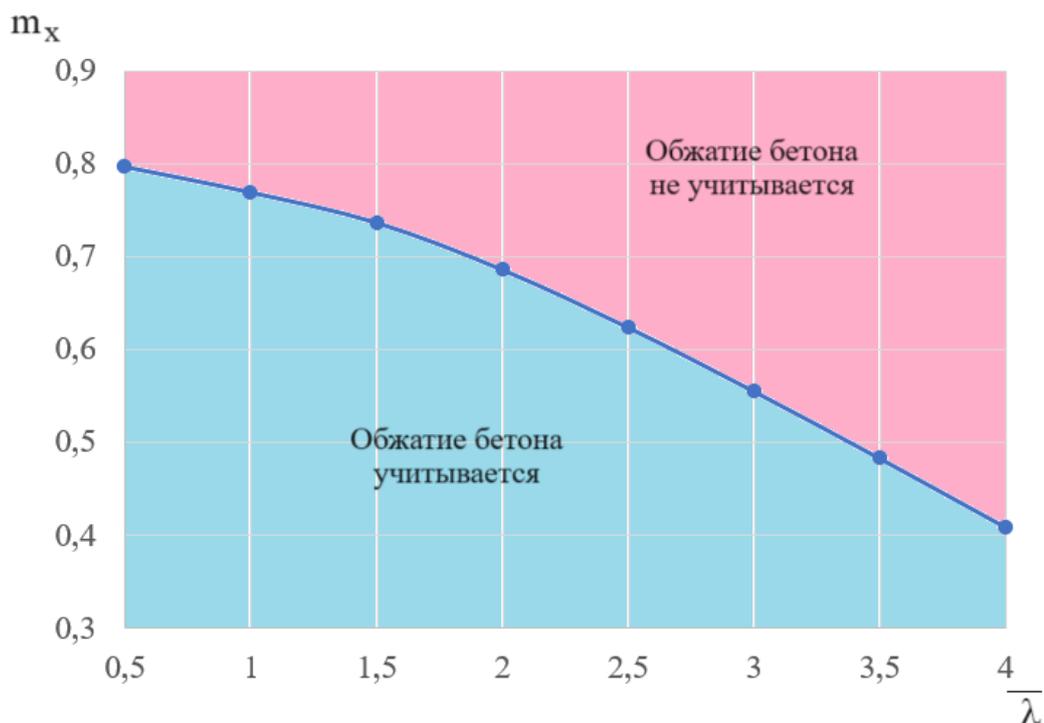


Рис. 4. – Зависимость относительных эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона, от относительной гибкости при $t_p/D_p = 0,0262$.

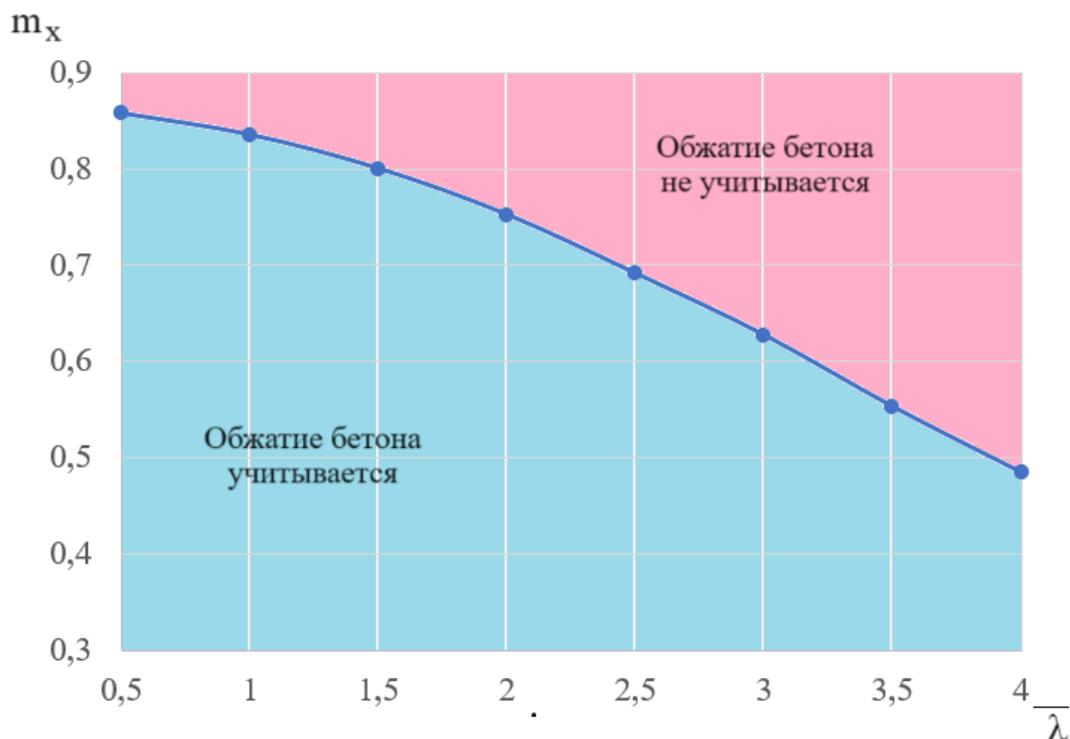


Рис. 5. – Зависимость относительных эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона, от относительной гибкости при $t_p/D_p = 0,0163$.

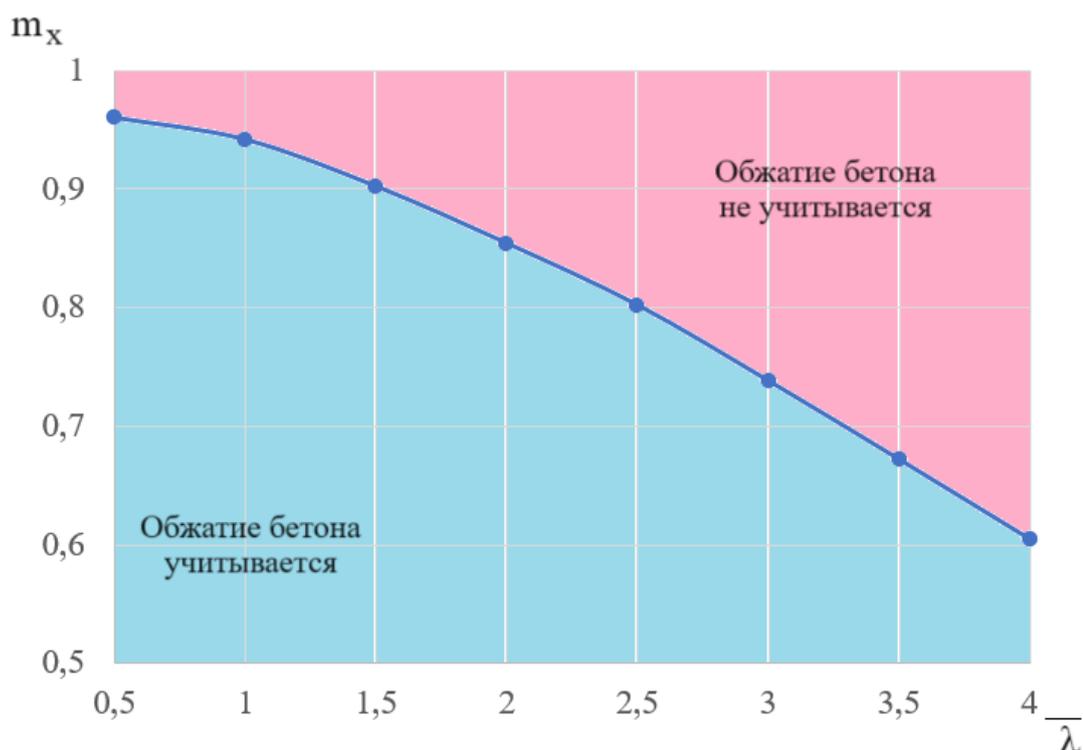


Рис. 6. – Зависимость относительных эксцентриситетов, ниже которых учитывается обжатие бетона, от относительной гибкости при $t_p/D_p = 0,0064$.

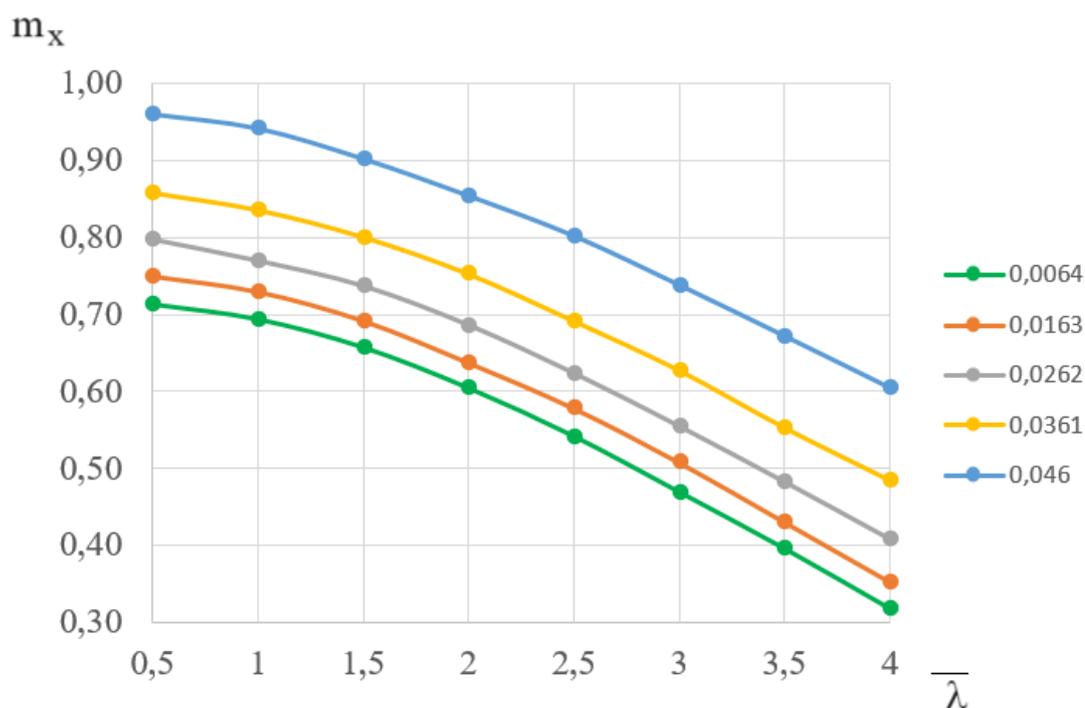


Рис. 7. Кривая предельных эксцентриситетов, при которых учитывается увеличение прочности бетона по формуле СП 266.

Выводы

Разработанный алгоритм расчета трубобетонных стержней учитывает изменение прочности стали и бетона на сжатие при учете обжатия в бетоне по формулам СП 266.

Анализ построенных кривых показывает, что чем толще стенка трубы по отношению к ее диаметру, тем больший относительный концевой эксцентриситет можно задать и сохранить эффект обжатия бетона. По приведённым графикам можно судить об эффективности работы бетона в трубе в зависимости от длины стержня и эксцентриситета приложения нагрузки.

Литература

1. Хайянь, Ц., Чэньин Ч., Кубасов А.Ю. Исследование применения трубобетонных элементов в условиях реконструкции // Инженерный вестник Дона. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4950 (дата обращения: 01.11.2023).

2. Резван, А. В., Колотиенко М.А. Рационализация технологических, конструктивных и архитектурных решений трубобетонных конструкций на примере колонн высотных зданий // Инженерный вестник Дона. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6475 (дата обращения: 01.11.2023).

3. Кришан А.Л., Заикин А.И., Мельничук А.С. Расчет прочности трубобетонных колонн // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2010. №1. С. 20–25. URL: cyberleninka.ru/article/n/raschet-prochnosti-trubobetonnuyh-kolonn (дата обращения: 01.11.2023).

4. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. Теория и практика: монография. М.: АСВ, 2020. 321 с.

5. Ведерникова А.А., Опбул Э.К. Расчет несущей способности внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом нелинейных

диаграмм материалов // Вестник гражданских инженеров. 2021. №1 (84). С. 36-45.

6. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.

7. 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.

8. Liew J.Y. R., Xiong M., Xiong D. Design of Concrete Filled Tubular Beam-columns with High Strength Steel and Concrete // Structures. 2016. №8. Ч. 2. С. 213-226. DOI:10.1016/j.istruc.2016.05.005

9. Portolés J.M., Romero M.L., Bonet J.L., Filippou F.C. Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading // Journal of Constructional Steel Research. 2011. №67. С. 623–633. DOI:10.1016/j.jcsr.2010.11.017

10. Liu D. Behaviour of eccentrically loaded high-strength rectangular concrete-filled steel tubular columns // Journal of Constructional Steel Research. 2006. №62. С. 839-846.

11. Цай Ш. Новейший опыт применения трубобетона в КНР // Бетон и железобетон. 2001. №3. С. 20-24.

12. Белый Г.И. Ведерникова А.А. Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022663635, от 18.07.2022. Заявка № 2022663036 от 11.07.2022. Роспатент. 2022. URL: new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 01.11.2023).

13. Белый Г.И. Ведерникова А.А. Программа для расчета трубобетонных конструкций «обратным» методом. Версия 2.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022682845, от



28.11.2022. Заявка № 2022682028 от 17.11.2022. Роспатент. 2022. URL: new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (дата обращения: 01.11.2023).

14. Астахов И.В. Пространственная устойчивость элементов конструкций из холодногнутых профилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. СПб., 2006. 123 с.

References

1. Khayyan TS., Chen'in CH., Kubasov A.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4950 (date views: 01.11.2023)

2. Rezvan A.V., Kolotiyenko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2020/6475 (date views: 01.11.2023).

3. Krishan A.L., Zaikin A.I., Mel'nichuk A.S. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh sooruzheniy i sooruzheniy. 2010. № 1. Pp. 20–25. URL: cyberleninka.ru/article/n/raschet-prochnosti-trubobetonnyh-kolonn (date views: 01.11.2023).

4. Krishan A.L., Rimshin V.I., Astaf'yeva M.A. Szhatyye trubobetonnyye elementy. Teoriya i praktika: monografiya. [Compressed concrete filled steel tube elements. Theory and practice: monograph.] M.: ASV, 2020. 321 p.

5. Vedernikova A.A., Opbul E.K. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2021. № 1 (84). Pp. 36-45.

6. Karpenko N.I. Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. M.: Stroyizdat. 1996. 416 p.

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

8. Liew J.Y. R., Xiong M., Xiong D. Structures. 2016. № 8. Part 2. Pp. 213-226. DOI:10.1016/j.istruc.2016.05.005.



9. Portolés J.M., Romero M.L., Bonet J.L., Filippou F.C. Journal of Constructional Steel Research. 2011. No. 67. Pp. 623–633. DOI:10.1016/j.jcsr.2010.11.017
10. Liu D. Journal of Constructional Steel Research. 2006. No. 62. Pp. 839-846.
11. Tsay SH. Beton i zhelezobeton. 2001.No. 3. Pp. 20-24.
12. Belyy G.I. Vedernikova A.A. Programma dlya rascheta trubobetonnykh konstruktsiy «obratnym» metodom. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2022663635, 18.07.2022. Zayavleniye № 2022663036 ot 11.07.2022. Rospatent. 2022. URL: new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (date views: 01.11.2023).
13. Belyy G.I. Vedernikova A.A. Programma dlya rascheta trubobetonnykh konstruktsiy «obratnym» metodom. Versiya 2.0. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2022682845, 28.11.2022. Zayavleniye № 2022682028 ot 17.11.2022. Rospatent. 2022. URL: new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet (date views: 01.11.2023).
14. Astakhov I.V. Prostranstvennaya ustoychivost' elementov konstruktsiy iz kholodnodeformirovannykh profiley [Spatial stability of structural elements made of cold-formed profiles]: dissertatsiya. ...kand. tekhn. nauk: 23.05.01. SPb, 2006. 123 p.