

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2024-38-3-2-11

НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С КРУГЛЫМИ ТРУБАМИ ПРИ ИЗГИБЕ

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ²⁾,
канд. техн. наук, доц. А.И. КОЛТУНОВ³⁾, канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ⁴⁾*

(^{1), 3), 4)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, ²⁾ ООО «СофтКлуб», Минск)

¹⁾ d.lazovski@psu.by, ²⁾ d.gluhov@psu.by, ³⁾ a.koltunov@psu.by, ⁴⁾ a.khatkevich@psu.by

¹⁾ ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5278-938X>

Рассмотрен вопрос применимости нелинейной деформационной модели для расчета изгибаемых трубобетонных элементов с круглыми трубами. Предложен критерий разрушения изгибаемого трубобетонного элемента без ограничения деформаций бетона при сжатии. Преимуществом данного критерия разрушения является возможность учета высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении изгибаемого трубобетонного элемента после достижения стальной трубы предела текучести и отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона. Произведено сопоставление результатов нелинейного расчета предельного усилия с экспериментальными данными из сформированной выборки исследований. Подтверждена применимость нелинейного расчета с учетом предложений авторов для трубобетонных элементов с круглыми трубами при изгибе для расчета момента, соответствующего началу текучести стали трубы.

Ключевые слова: *трубобетонный элемент, нелинейная деформационная модель, диаграммы деформирования, критерий разрушения.*

Введение. Широкое применение трубобетонных элементов для тяжело нагруженных конструкций зданий и сооружений объясняется их эффективной работой при сжатии [1–4]. Бетон внутри трубы находится в условиях стесненного поперечного расширения, что благоприятно сказывается на его физико-механических характеристиках, повышая, в частности, прочность аналогично косвенному армированию [5–7]. Наибольшую эффективность имеют центрально и внецентренно с малыми эксцентриситетами сжатые трубобетонные элементы [8]. При этом эффективность работы трубобетонных элементов при изгибе является менее изученной областью исследований¹ [8–12]. В изгибаемых трубобетонных элементах стальная труба является одновременно продольной арматурой в растянутой и сжатой зонах, а также поперечной в зоне среза. Заключенный в трубу бетон препятствует потере устойчивости стенок трубы и так же, как и при сжатии, находится в условиях стесненной деформации во всех направлениях, что благоприятно сказывается на его трещиностойкости, прочности и деформативности [13; 14].

Последние исследования свидетельствуют об эффективности наполнения трубы для повышения ее прочности при изгибе. Стальная труба с заглушенными торцами, полностью заполненная водой, имеет прочность в 5 раз превышающую для аналогичной трубы без заполнения [15]. При изгибе «гидравлическая балка» из стальной трубы стремится деформироваться с уменьшением ее внутреннего объема, но несжимаемая жидкость препятствует деформации стальной трубы. В изгибаемом трубобетонном элементе роль несжимаемой жидкости играет бетон.

Работа под нагрузкой изгибаемых трубобетонных элементов является предметом исследования до настоящего времени. Особенно важными являются вопросы, связанные с расчетом параметров их напряженно-деформированного состояния [14–18]. На основании имеющихся базовых исследований трубобетонных элементов как одного из видов сталежелезобетонных элементов издан нормативный документ СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования»². В нормах в качестве основного для изгибаемых трубобетонных элементов принято допущение о том, что расчетные сопротивления бетона и металла трубы соответствуют одноосному напряженному состоянию. Работа бетона в растянутой зоне не учитывается. Принятая схема усилий при прямоугольных эпюрах распределения нормальных напряжений по поперечному сечению изгибаемого трубобетонного элемента с учетом совместной работы бетона и трубы в предельном по прочности состоянии представлена на рисунке 1.

¹ Казимагомедов Ф.И. Эффективные трубобетонные изгибаемые элементы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – Харьков, 2015. – 20 с.

² СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные: Правила проектирования: свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. № 1030/пр: дата введения 01 июля 2017 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

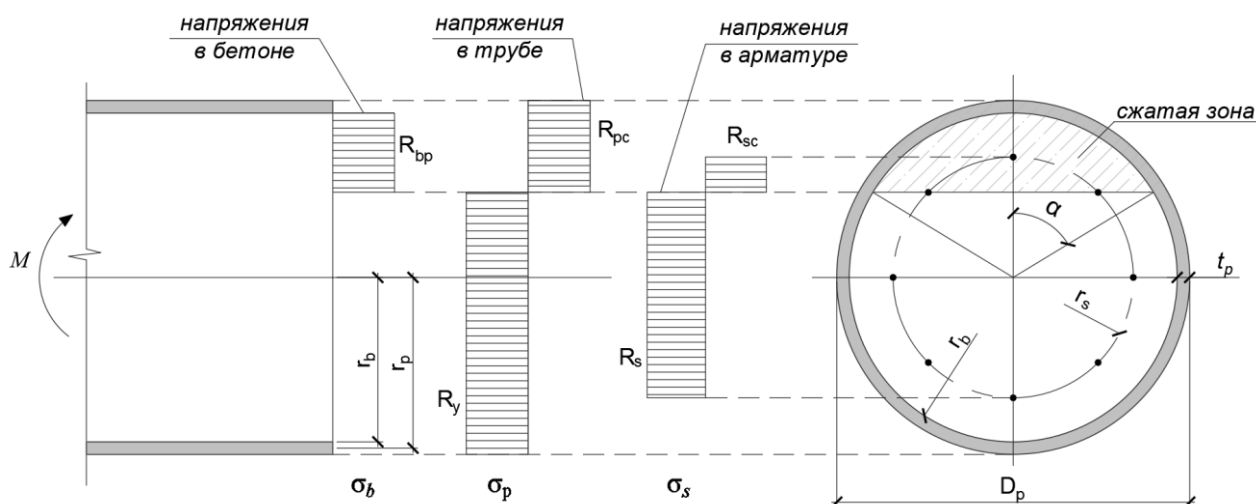


Рисунок 1. – Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого трубобетонного элемента, при его расчете по прочности

Значение предельного изгибающего момента M_{ult} относительно центра тяжести для изгибаемых элементов определяют по формуле

$$M_{ult} = \frac{2}{3} r_b^3 R_{bp} \sin^3 \alpha + \frac{1}{\pi} A_s r_s \sin \alpha (R_s + R_{sc}) + \frac{1}{\pi} A_p r_p \sin \alpha (R_y + R_{pc}), \quad (1)$$

где угол α , радианы;

A_s – площадь всей стержневой арматуры;

r_b – радиус бетонного ядра;

r_s – радиус окружности, на которой расположена стержневая арматура;

r_p – радиус срединной поверхности трубы.

Угол α , радианы, находят из уравнения

$$r_b^2 \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) R_{bp} + \frac{\alpha}{\pi} A_s R_{sc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_s R_s + \frac{\alpha}{\pi} A_p R_{pc} - \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} \right) A_p R_y = 0. \quad (2)$$

Предполагается сплошное заполнение трубы бетоном и не решается вопрос расчета при более сложных поперечных сечениях (с полостями, в том числе, смещенными относительно центра трубы, с рассредоточенным размещением арматуры в сжатой и растянутой зонах и др.).

В работе [19] авторы предлагают нелинейный расчет внецентренно сжатых трубобетонных элементов с учетом упругопластической работы бетона как при сжатии, так и при растяжении, в соответствии с трехлинейными диаграммами деформирования для железобетонных конструкций³. В настоящем исследовании предлагается диаграмму деформирования бетона принять нелинейной, аналогично железобетонным⁴ и сталежелезобетонным элементам [20; 21], но с горизонтальным участком при сжатии (рисунок 2). Данное предложение объясняется успешной апробацией нелинейной диаграммы деформирования бетона при сжатии и растяжении для сталежелезобетонных конструкций [20; 21]. Модернизация диаграммы бетона при сжатии введением горизонтального участка без ограничения предельных деформаций и ограничением нормальных напряжений вызвана результатами исследования [19], в которых отмечается надежная работа при изгибе трубобетонных элементов с сохранением совместной работы трубы и бетона на всех стадиях, включая критическую (относительные деформации стали трубы превышали предел текучести), ограничением возможности поперечного расширения бетона сжатой зоны в трубе.

В работе [19], равно как и ряде других исследований [22–29], предлагаются методики нелинейного расчета сжатых трубобетонных элементов без представления в печати их практической реализации и сопоставления с экспериментальными данными. В связи с этим целью настоящей работы является исследование применимости нелинейного деформационного расчета для изгибаемых трубобетонных элементов на примерах результатов экспериментальных исследований [16].

³ СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр: дата введения 20 июня 2019 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

⁴ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

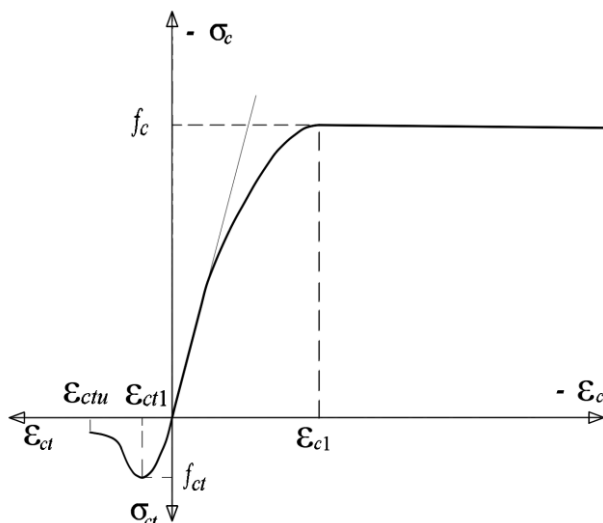


Рисунок 2. – Расчетные диаграммы деформирования бетона

Предпосылки расчета. Согласно деформационной модели поперечное сечение изгибаемого трубобетонного элемента, состоящего из стальной трубы с наружным диаметром D_p и толщиной стенки t_p с бетонным наполнением, представляется как совокупность элементарных площадок (рисунок 3), в пределах которых напряжения считаются равномерно распределенными. Распределение относительных деформаций по высоте поперечного сечения трубобетонного элемента подчиняется гипотезе плоских сечений продольных относительных деформаций бетона и трубы растянутой и сжатой зон.

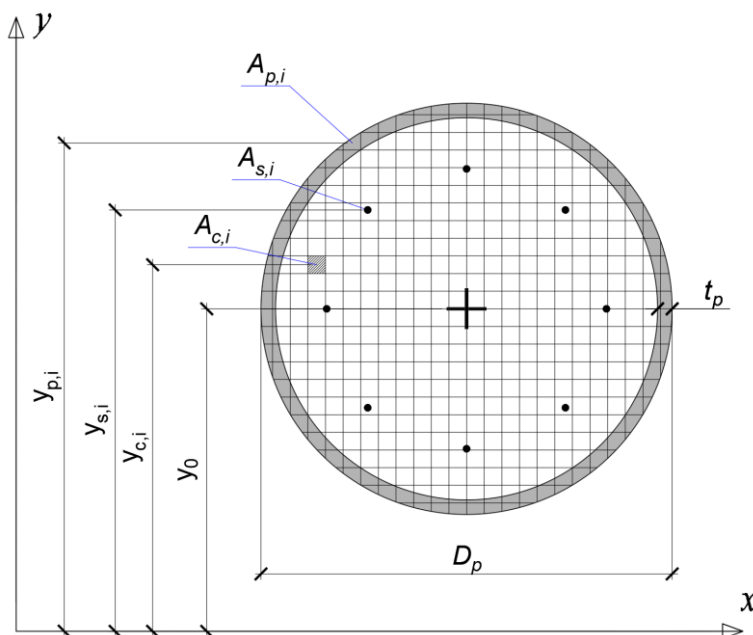


Рисунок 3. – Расчетное поперечное сечение изгибаемого трубобетонного элемента

В качестве аппроксимации диаграммы деформирования бетона призмочной прочностью при сжатии f_c с начальным модулем упругости E_c , устанавливающей зависимость между напряжениями при сжатии (растяжении) σ_c (σ_{ct}) и относительными деформациями ϵ_c (ϵ_{ct}), принимаем предложенную нелинейную диаграмму состояния бетона (см. рисунок 2) без ограничения ее длины по деформациям при сжатии с целью получения полного перераспределения усилий между бетоном и стальной трубой изгибаемого трубобетонного элемента. Многоосное напряженное состояние бетона при сжатии и растяжении изгибаемого трубобетонного элемента не учитывается. Предельная растяжимость бетона ϵ_{ctu} определяется по формуле [30]:

$$\epsilon_{ctu} = \frac{K \cdot \epsilon_{ct1}}{2}; \quad K = 6,4 + 0,1223 f_c. \tag{3}$$

Расчетную диаграмму деформирования стали трубы при сжатии и растяжении сопротивлением f_y с начальным модулем упругости E_s , устанавливающей зависимость между напряжениями σ_s и относительными деформациями ε_s , принимаем согласно^{5,6} с линейными участками и ограничением относительных деформаций ε_p (рисунок 4).

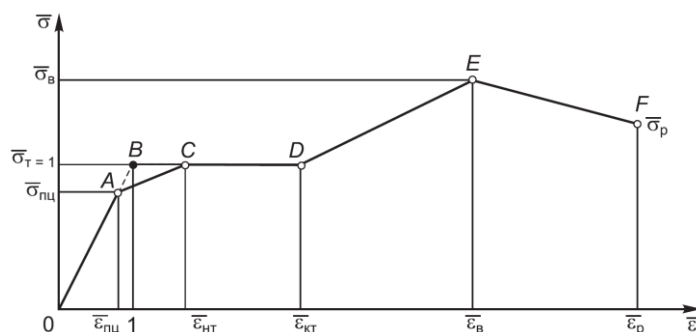


Рисунок 4. – Расчетная диаграмма деформирования стали трубы⁷

Система уравнений для расчета параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемого трубо-бетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и гипотезы плоских сечений, описывающей положение плоскости распределения относительных деформаций по его поперечному сечению, имеет вид:

$$\begin{cases} \sum \sigma_{c,i}(\varepsilon(y_{c,i}))A_{c,i}(y_{c,i})(y_{c,i} - y_0) + \sum \sigma_{p,i}(\varepsilon(y_{p,i}))A_{p,i}(y_{p,i})(y_{p,i} - y_0) - M = 0 \\ \sum \sigma_{c,i}(\varepsilon(y_{c,i}))A_{c,i}(y_{c,i}) + \sum \sigma_{p,i}(\varepsilon(y_{p,i}))A_{p,i}(y_{p,i}) = 0 \\ \varepsilon(y_{c,i}) = \frac{1}{r_y}(y_{c,i} - y_0) \\ \varepsilon(y_{p,i}) = \frac{1}{r_y}(y_{p,i} - y_0) \end{cases}, \quad (4)$$

где $\sigma(y)$, $\varepsilon(y)$ – нормальные напряжения, относительные деформации в элементарной площадке бетона, стали трубы с координатой y ;

$A_c(y)$, $A_p(y)$ – площадь поперечного сечения элементарной площадки соответственно бетона и трубы с координатой y ;

y_0 – координата центра тяжести поперечного сечения изгибаемого трубобетонного элемента;

$1/r_y$ – кривизна продольной оси трубобетонного элемента в плоскости оси y .

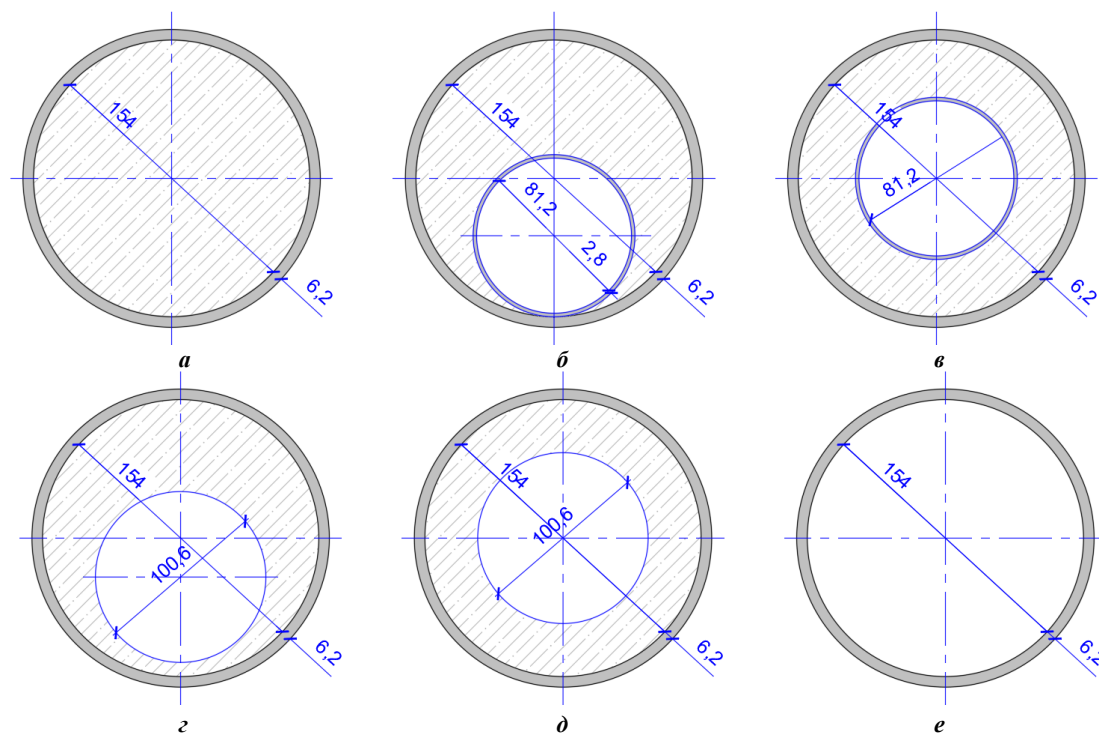
Критерием разрушения изгибаемого трубобетонного элемента принимаем максимальный изгибающий момент от внешних воздействий, который воспринимает элемент. Максимальное значение изгибающего момента M_u , при котором процесс последовательных приближений сходится (соблюдаются условия равновесия и условие совместности деформаций (4)), соответствует прочности трубобетонного элемента. Преимуществом такого критерия разрушения является отсутствие необходимости нормирования предельной сжимаемости бетона и учет высокой степени перераспределения усилий в поперечном сечении трубобетонного элемента. Критерием разрушения стали трубы при растяжении принимается достижение ею относительных деформаций, соответствующих разрыву.

Результаты исследования и их анализ. Для исследования применимости нелинейного деформационного расчета для изгибаемых трубобетонных элементов различных поперечных сечений были приняты результаты экспериментальных исследований [16]. Поперечные сечения опытных образцов с их геометрическими размерами приведены на рисунке 5. Проведены испытания балок из трубобетона, со сплошным заполнением (рисунок 5, а) или частичным (рисунок 5, б–д) с внутренней полостью, в том числе, смещенной в сторону растянутой зоны, где бетон работает неэффективно (рисунок 5, б-2), а дополнительная труба меньшего диаметра полости в сторону растянутой зоны (рисунок 5, б) позволяет увеличить в ней внутренние усилия. Опытные образцы заполнялись бетоном: с маркировкой серии ИВ – вибрированным; с маркировкой серии ИЦ – центрифугированным. Кроме того, были испытаны при изгибе стальные трубы без заполнения бетоном. Схема испытания трубобетонных балок – однопролетная балочная, с шарнирными опорами и двумя сосредоточенными силами в пролете. Прочностные и деформационные характеристики бетона и стали трубы опытных образцов приведены в таблице 1. Приняты следующие обозначения: D_p – наружный диаметр трубы; t_p – толщина стенки трубы; t_c – толщина слоя бетона по периметру трубы; σ_y , σ_u , E_s – предел текучести, временное сопротивление и модуль упругости стали трубы соответственно; f_c – призмная прочность бетона заполнения.

⁵ СП 5.04.01-2021. Стальные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 147 с.

⁶ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Основные положения. – Свод правил: издание официальное: утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр: дата введения 27 августа 2017 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

⁷ См. сноску 5.



a – ИВ-2-2; б – ИВ-2-2ТВ, в – ИВ-2-2Т; г – ИВ-2-2ПВ; д – ИВ-2-2П; е – И-2

Рисунок 5. – Поперечные сечения опытных образцов [17]

Таблица 1. – Прочностные и деформационные параметры бетона и стали трубы опытных образцов [17]

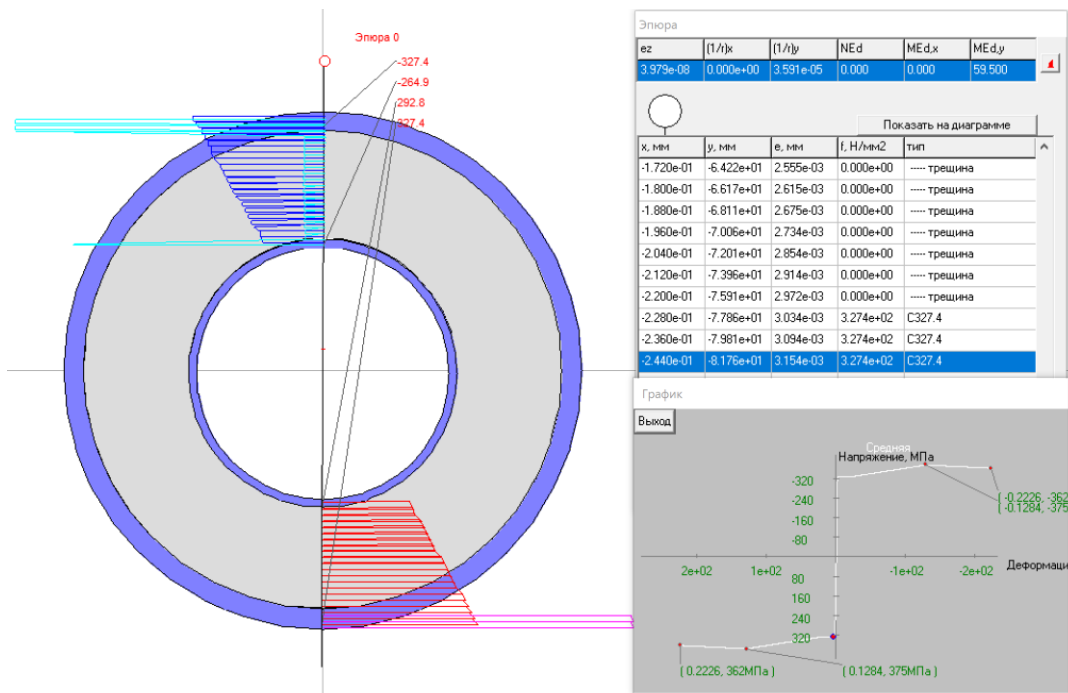
Шифр серии	D_p , мм	t_p , мм	t_c , мм	σ_y , МПа	σ_u , МПа	$E_s \cdot 10^{-5}$, МПа	f_c , МПа
ИВ-1-1	102,3	2,3	сплошной	310	375	2,10	40,0
ИВ-2-2	166,4	6,2	сплошной	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2Т	166,4	6,2	33,6	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2ТВ	166,4	6,2	33,6	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2П	166,4	6,2	27,8	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-2-2ПВ	166,4	6,2	27,8	327,4	375	2,25	22,5
ИВ-3-3	325,0	8,0	сплошной	253,4	270	1,67	15,0
ИЦ-3-4	325,0	8,0	60	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-6	325,0	8,0	72	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-7	325,0	8,0	33	253,4	270	1,67	24,0
ИЦ-3-8	325,0	8,0	30	253,4	270	1,67	24,0
И-1	102,3	2,3	-	310	375	2,10	-
И-2	166,4	6,2	-	327,4	375	2,25	-
И-3	325,0	8,0	-	253,4	375	1,67	-

При испытании фиксировали нагрузки, соответствующие: продольным деформациям в сжатой зоне элемента, равным пределу текучести трубы (M_1); максимальной нагрузке, которую способен выдержать элемент (M_2). Расчет прочности изгибаемого трубобетонного элемента (M_1) в [16] выполнялся при треугольной эпюре в сжатой зоне сечения в бетоне и трубе и треугольной в растянутой зоне только в трубе. Работа бетона в растянутой зоне не учитывалась. Учет объемного напряженного состояния стали трубы и бетона производился коэффициентами эффективности к расчетным сопротивлениям: стали трубы $\alpha = 1,12$; бетона $\beta = 2$. Расхождение результатов расчета с опытными данными не превышало 12,3% [16].

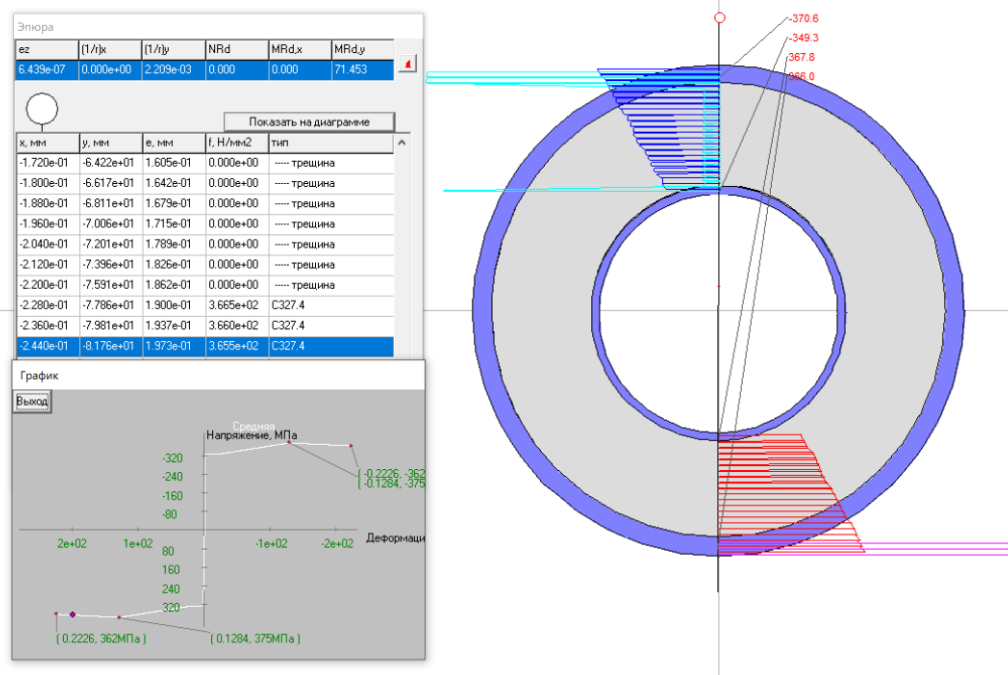
Вычисление предельных значений изгибающего момента M_2 , соответствующего исчерпанию прочности изгибаемого трубобетонного элемента, не производилось. Отмечалась высокая надежность трубобетона (опытные значения M_2 превышали M_1 в 1,06...1,64 раза) и совместная работа бетона и трубы до достижения предельного изгибающего момента M_2 . Отмечалось, что опытные образцы изгибаемых трубобетонных элементов не удалось разрушить, хотя в сжатой и растянутой зонах были достигнуты продольные деформации, значительно превышающие предел текучести стали трубы. Высокая степень надежности конструкций из трубобетона и их способность длительное время выдерживать нагрузку на стадии пластической работы трубобетонного элемента отмечается также и в работе [31].

В современных нормативных документах предъявляется обязательное требование общей живучести сооружения – обеспечение прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов. Возможность учета работы трубобетонных изгибаемых элементов в пластической стадии их работы позволяет соблюсти данное требование при проектировании сооружений с их использованием.

Предлагаемый нелинейный расчет и критерий разрушения изгибаемых трубобетонных элементов на основе полных диаграмм деформирования бетона и стали трубы позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния на любой стадии их работы, включая предельную по прочности, которой соответствует изгибающий момент M_2 . На рисунке 6 приведен пример результатов вычисления распределения относительных деформаций и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения трубобетонного элемента ИВ-2-2Т при достижении сталью трубы предела текучести и в предельной стадии перед разрушением.



а



б

Рисунок 6. – Результаты расчета изгибаемого трубобетонного элемента при: а – $M_1=59,5$ кН·м; б – $M_1=71,5$ кН·м (цифры справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

С целью верификации предлагаемого нелинейного расчета изгибаемых трубобетонных элементов проведено сопоставление результатов расчета с опытными данными из сформированной выборки исследований [16] на двух стадиях их работы под нагрузкой (M_1 – при изгибающем моменте, соответствующем относительным деформациям начала текучести стали трубы; M_2 – при изгибающем моменте, соответствующем предлагаемому критерию разрушения) (таблица 2).

Таблица 2. – Сопоставление результатов нелинейного расчета с опытными данными

Шифр серии	$M_{exp(1)}$, кНм	$M_{th(1)}$, кНм	$\frac{M_{exp(1)}}{M_{th(1)}}$	$M_{exp(2)}$, кНм	$M_{th(2)}$, кНм	$\frac{M_{exp(2)}}{M_{th(2)}}$
ИВ-1-1	8,4	8,10	1,04	13,8	9,23	1,50
ИВ-2-2	52,3	52,3	1,00	63,0	65,3	0,96
ИВ-2-2Т	59,5	59,5	1,00	64,8	71,5	0,91
ИВ-2-2ТВ	56,0	63,0	0,89	68,6	75,9	0,90
ИВ-2-2П	52,5	55,0	0,95	60,2	64,4	0,93
ИВ-2-2ПВ	55,3	58,0	0,95	56,0	64,3	0,87
ИВ-3-3	210,0	210,0	1,00	305,0	233,9	1,30
ИЦ-3-4	225,0	225,0	1,00	332,0	240,5	1,38
ИЦ-3-6	210,0	225,0	0,93	313,0	241,4	1,29
ИЦ-3-7	226,0	225	1,00	314,0	234,4	1,34
ИЦ-3-8	215,0	223	0,96	316,0	233,2	1,35
И-1	8,6	6,20	1,38	10,5	7,8	1,35
И-2	36,5	47	0,78	49,0	58,1	0,84
И-3	187,0	187,0	1,00	225,0	212,4	1,06

Результаты сопоставления данных нелинейного расчета изгибаемых трубобетонных элементов при изгибающем моменте начала текучести трубы (M_1) показывает удовлетворительную сходимость с опытными данными из работы [16]. Аналогичное сопоставление при предельном изгибающем моменте (M_2) после достижения стальной трубы предела текучести показывает значительный разброс результатов, что может быть объяснено запредельным состоянием бетона и стали трубы в виде преждевременного смятия в сжатой зоне, нарушением сцепления бетона с трубой, которые не учитываются в предлагаемом расчете.

При дальнейшем совершенствовании методик расчета трубобетонных элементов предлагаемый нелинейный расчет может быть использован для оценки возможного прогрессирующего обрушения зданий с применением изгибаемых трубобетонных элементов из круглых труб. Высокая степень деформирования изгибаемых элементов из трубобетона и их способность длительное время выдерживать нагрузку после начала разрушения (на стадии пластической работы трубобетонного элемента при достижении стальной трубы предела текучести, разрушении сжатого бетонного ядра) хорошо влияет на повышение общей живучести сооружения, что является обязательным требованием СП 35.13330.2011 «Мосты и трубы»⁸ в части обеспечения прочности и устойчивости формы и положения остальных элементов при выходе из строя отдельных конструктивных элементов.

Заключение. На примере изгибаемых трубобетонных элементов из круглых труб продемонстрирована применимость нелинейного метода расчета для трубобетонных элементов с круглыми трубами для расчета изгибающего момента, соответствующего началу текучести стали трубы.

Предлагаемый подход к расчету основан на использовании полных диаграмм деформирования материалов и допущении о линейном распределении относительных деформаций трубы и бетона по поперечному сечению, что позволяет учесть пластическую работу под нагрузкой изгибаемых трубобетонных элементов, включая нисходящую ветвь диаграммы деформирования стали трубы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кришан А.Л. Трубобетонные колонны для многоэтажных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2009. – № 4. – С. 75–80.
2. Дуванова И.А., Сальманов И.Д. Трубобетонные колонны в строительстве высотных зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6(21). – С. 89–103.
3. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 1. Опыт применения трубобетона с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415.
4. Пенкина Е.В., Плотников А.И. К вопросу о применении трубобетонных колонн в многоэтажных и высотных зданиях // Междунар. молодежная науч. конф. по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу – творчество молодых»: материалы и доклады: в 3 частях, Йошкар-Ола, 19–20 апр. 2013 г. / Поволжский государственный технологический университет. Том Часть 3. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2013. – С. 121–123.

⁸ СП 35.13330.2011. Мосты и трубы. – Свод правил: издание официальное: утв. Министерством регионального развития Российской Федерации от 28 декабря 2010 г. № 822: дата введения 20 мая 2011 г. – URL: <http://www.consultant.ru>.

5. О проблеме расчета трубобетонных конструкций с оболочкой из разных материалов. Часть 2. Расчет трубобетонных конструкций с металлической оболочкой / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков и др. // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т. 7, № 4. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/112TVN415.pdf>. DOI: 10.15862/112TVN415.
6. Несветаев Г.В., Резван И.В. Оценка прочности трубобетона // Фундаментальные исследования. – 2011. – № 12-3. – С. 580–583.
7. Кикин А.И., Санжаровский Р.С., Трульв В.А. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном. – М.: Стройиздат, 1974. – 144 с.
8. Хазов П.А., Ситникова А.К., Чобакова Е.А. Расчет трубобетонных конструкций: современное состояние вопроса и перспективы дальнейших исследований (обзор) // Приволжский научный журнал. – 2023. – № 4(68). – С. 57–76.
9. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Смирнов П.П. Расчетно-экспериментальные исследования изгибаемых трубобетонных конструкций // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – № 4. – С. 34–38.
10. Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. Тенденции применения трубобетонных конструкций для строительства малых мостов // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России : Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Волгоград, 19–21 мая 2021 г. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 109–117.
11. Повышение нагрузочной способности трубобетонной балки / И.Г. Овчинников, Д.Н. Парышев, А.В. Ильяков и др. // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2019. – № 4. – С. 58–66.
12. Якупова Л.З., Астанков К.Ю., Овчинников И.Г. О возможности применения свода правил СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования» для проектирования трубобетонных конструкций в малом мостостроении // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2023. – № 2. – С. 112–121.
13. Исследование напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов строительных конструкций из трубобетона / О.Е. Сысоев, С.В. Макаренко, А.Ю. Добрышкин и др. // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2015. – Т. 1, № 3. – С. 94–99.
14. Deng Y.-Q., Huang Y., Young B. Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending // Engineering Structures. – 2024. – Vol. 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
15. Попов И.П. Повышение несущей способности балки // Вестн. Инженерной школы Дальневосточного федерального ун-та. – 2024. – № 3(60). – С. 96–101. DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
16. Стороженко Л.И., Ефименко В.И., Плахотный П.И. Изгибаемые трубобетонные конструкции. – Киев: Будівельник, 1993. – 104 с.
17. Упругопластическое деформирование сталебетонных балок с локальным смятием при трехточечном изгибе / П.А. Хазов, О.И. Ведяйкина, А.П. Помазов и др. // Проблемы прочности и пластичности. – 2024. – Т. 86, № 1. – С. 71–82. DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
18. Инновационная трубобетонная балка для пролетных строений балочных малых мостов / О.Ю. Моисеев, Д.Н. Парышев, И.Г. Овчинников и др. // Инновационный транспорт. – 2016. – № 2(20). – С. 67–71. DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-67-71.
19. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 9. – С. 1469–1483. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
20. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
21. 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. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
22. Хашхожев К.Н., Аваков А.А. Расчет центрально сжатых трубобетонных колонн кольцевого сечения с учетом физической нелинейности // Строительство и архитектура. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 14–18. DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
23. О работе сталежелезобетонных конструкций при внецентренном сжатии / Д.В. Конин, А.С. Крылов, Д.Н. Гаврилов и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 12. – С. 31–37. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
24. Кришан А.Л., Сагадатов А.И., Мельничук А.С. Реализация нелинейной деформационной модели при расчете прочности трубобетонных колонн // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2010. – № 10. – С. 635–643.
25. Определение напряженно-деформированного состояния коротких внецентренно-сжатых трубобетонных колонн методом конечных элементов путём сведения трёхмерной задачи к двумерной / В.С. Чепурненко, Б.М. Языев, П.М. Урвачёв и др. // Строительство и архитектура. – 2020. – Т. 8., № 4. – С. 87–94. DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.
26. Кришан А.Л. Диаграммный расчет прочности трубобетонных колонн // Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерные системы – 2011»: тез. докл., Москва, 05–08 апр. 2011 г. / Под общ. ред. С.Н. Кривошапка. – М.: Рос. ун-т дружбы народов, 2011. – С. 79.
27. Кришан А.Л., Трошкина Е.А., Кузьмин А.В. Предложения по расчету прочности трубобетонных колонн // Вестн. Магнитогорского гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. – 2011. – № 1(33). – С. 66–69.
28. Ведерникова А.А. Совершенствование методики расчета трубобетонных элементов обратным численно-аналитическим методом и ее применение // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 11(107). – С. 437–449.
29. Snigireva V.A., Gorynin G.L. The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – 83(7). – P. 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7.
30. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: моногр. – Брест: БГТУ. – 2003. – 252 с.
31. Астанков К.Ю. Анализ современных подходов к проектированию и строительству арочных мостов с использованием трубобетона // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2023. – Т. 10, № 4. – DOI: 10.15862/11SAT5423.

REFERENCES

1. Krishan, A.L. (2009). Trubobetonnye kolonny dlya mnogoetazhnykh zdaniy [The concrete-filled steel tube columns for high-rise buildings]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii [Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings]*, (4), 75–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Duvanova, I.A. & Sal'manov, I.D. (2014). Trubobetonnye kolonny v stroitel'stve vysotnykh zdaniy i sooruzhenii [Concrete-filled steel tube columns in construction high-rise building and structures]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenii [Construction of Unique Buildings and Structures]*, 6(21), 89–103. (In Russ., abstr. in Engl.).

3. Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Chesnokov, G.V. & Mikhaldykin, E.S. (2015). O probleme rascheta trubobetonnnykh konstruksii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 1. Opyt primeneniya trubobetona s metallicheskoi obolochkoi [About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 7(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/112TVN415.
4. Penkina, E.V. & Plotnikov, A.I. (2013). K voprosu o primeneniі trubobetonnnykh kolonn v mnogoetazhnykh i vysotnykh zdaniyakh. *Mezhdunar. molodezhnaya nauch. konf. po estestvennonauchnym i tekhnicheskim distsiplinam «Nauchnomu progressu – tvorchestvo molodykh»*, v 3 chastyakh, Tom Chast' 3: materialy i doklady (121–123). Ioshkar-Ola: Povolzhskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet. (In Russ.).
5. Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Chesnokov, G.V. & Mikhaldykin, E.S. (2015). O probleme rascheta trubobetonnnykh konstruksii s obolochkoi iz raznykh materialov. Chast' 2. Raschet trubobetonnnykh konstruksii s metallicheskoi obolochkoi [About the problem of the analysis of tube-confined concrete structures with a shell made of different materials. Part 2. Calculation of tube-confined concrete structures with a metallic shell]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»*, 7(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/112TVN415.
6. Nesvetaev, G.V. & Rezvan, I.V. (2011). Otsenka prochnosti trubobetona. *Fundamental'nye issledovaniya*, (12-3), 580–583. (In Russ.).
7. Kikin, A.I., Sanzharovskii, R.S. & Trull', V.A. (1974). *Konstruksii iz stal'nykh trub, zapolnennykh betonom*. Moscow: Stroizdat. (In Russ.).
8. Khazov, P.A., Sitnikova, A.K. & Chibakova, E.A. (2023). Raschet trubobetonnnykh konstruksii: sovremennoe sostoyanie voprosa i perspektivy dal'neishikh issledovaniy (obzor). *Privolzhskii nauchnyi zhurnal*, 4(68), 57–76. (In Russ.).
9. Arleninov, P.D., Krylov, S.B. & Smirnov, P.P. (2017). Raschetno-eksperimental'nye issledovaniya izgibaemykh trubobetonnnykh konstruksii. *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii*, (4), 34–38. (In Russ.).
10. Astankov, K.Yu. & Ovchinnikov, I.G. (2021). Tendentsii primeneniya trubobetonnnykh konstruksii dlya stroitel'stva mal'nykh mostov. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress v dorozhnoi otrasli yuga Rossii: Materialy XV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* (109–117). Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.).
11. Ovchinnikov, I.G., Paryshev, D.N., Il'tyakov, A.V., Moiseev, O.Yu., Kharin, V.V., Popov, I.P. & Kharin, D.A. (2019). Povyshenie nagruzochnoi sposobnosti trubobetonnnoi balki [Increasing the load capacity of a concrete beam]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport facilities. Ecology]*, (4), 58–66. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Yakupova, L.Z., Astankov, K.Yu., & Ovchinnikov, I.G. (2023). O vozmozhnosti primeneniya svoda pravil SP 266.1325800.2016 «Konstruksii stalezhelezobetonnnye. Pravila proektirovaniya» dlya proektirovaniya trubobetonnnykh konstruksii v malom mostostroenii [The code of norms SP 266.1325800.2016 «Composite steel and concrete structures. Design rules» applicability for the low-span bridges made of concrete-filled steel tubes design]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport facilities. Ecology]*, (2), 112–121. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Sysoev, O.E., Makarenko, S.V., Dobryshkin, A.Yu. & Kuznetsov, E.A. (2015). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya izgibaemykh elementov stroitel'nykh konstruksii iz trubobetona. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 1(3), 94–99. (In Russ.).
14. Deng, Y.-Q., Huang, Y. & Young, B. (2024). Design of concrete-filled high-strength steel RHS and SHS tubes under bending. *Engineering Structures*, 320. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.118891.
15. Popov, I.P. (2024). Povyshenie nesushchei sposobnosti balki [Increasing the load-bearing capacity of the beam]. *Vestn. Inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo un-ta [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, 3(60), 96–101. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24866/2227-6858/2024-3/96-101.
16. Storozhenko, L.I., Efimenko, V.I. & Plakhotnyi, P.I. (1993). *Izgibaemye trubobetonnnye konstruksii*. Kyiv: Budivel'nik. (In Russ.).
17. Khazov, P.A., Vedyaikina, O.I., Pomazov, A.P. & Kozhanov, D.A. (2024). Uprugoplasticheskoe deformirovanie stalebetonnnykh balok s lokal'nym smyatiem pri trekhtochesnom izgibe [Elastic-plastic deformation of steel-concrete beams with local crumpling during three-point bending]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*, 86(1), 71–82. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-1-71-82.
18. Moiseev, O.Yu., Paryshev, D.N., Ovchinnikov, I.G., Kharin, V.V. & Ovchinnikov, I.I. (2016). Innovatsionnaya trubobetonnaya balka dlya proletnykh stroenii balochnykh mal'nykh mostov. *Innovatsionnyi transport*, 2(20), 67–71. (In Russ.). DOI: 10.20291/2311-164X-2016-2-67-71.
19. Lazovskii, D.N., Gil', A.I. & Glukhov, D.O. (2024). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu stalezhelezobetonnnykh elementov [Deformation approach to the calculation of compressive strength of steel-reinforced concrete elements]. *Vestnik MGSU*, 19(9), 1469–1483. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1469-1483.
20. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O., Khatkevich, A.M., Gil', A.I. & Chaparanganda, E. (2024). Nelineinyi raschet izgibaemykh stalezhelezobetonnnykh elementov [Nonlinear calculation of bent steel-reinforced concrete elements]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Priklad. nauki [Herald of Polotsk State University. Series F, Civil engineering. Applied sciences]*, 2(37), 9–23. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
21. Vedernikova, A.A. & Opubl, E.K. (2021). Raschet nesushchei sposobnosti vnetsentrenno szhatykh trubobetonnnykh elementov s uchetom nelineinykh diagramm materialov [Bearing capacity calculation of eccentrically compressed concrete filled steel tube columns taking into account non-linear diagrams of materials]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*, 1(84), 36–45. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-1-36-45.
22. Khashkhozhev, K.N. & Avakov, A.A. (2021). Raschet tsentral'no szhatykh trubobetonnnykh kolonn kol'tsevogo secheniya s uchetom fizicheskoi nelineinosti [Calculation of centrally compressed concrete filled steel tubular columns of annular section taking into account physical nonlinearity]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 9(3), 14–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2021-9-3-14-18.
23. Konin, D.V., Krylov, A.S., Gavrilov, D.N., Zhdanova, A.A. & Voropaeva, M.I. (2023). O rabote stalezhelezobetonnnykh konstruksii pri vnetsentrennom szhatii. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (12), 31–37. (In Russ.). DOI: 10.33622/0869-7019.2023.12.31-37.
24. Krishan, A.L., Sagadatov, A.I. & Mel'nichuk, A.S. (2010). Realizatsiya nelineinoy deformatsionnoi modeli pri raschete prochnosti trubobetonnnykh kolonn. *Predotvrashchenie avarii zdaniy i sooruzhenii*, (10), 635–643. (In Russ.).
25. Chepurnenko, V.S., Yazhev, B.M., Urvachev, P.M. & Avakov, A.A. (2020). Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya korotkiy vnetsentrenno-szhatykh trubobetonnnykh kolonn metodom konechnykh elementov putem svedeniya trekhmernoi zadachi k dvumernoi [Determination of stress-strain state of short eccentrically loaded concrete-filled steel tubular (CFST) columns using finite element method with reducing the problem from three-dimensional to two-dimensional]. *Stroitel'stvo i arkhitektura [Construction and Architecture]*, 8(4), 87–94. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29039/2308-0191-2020-8-4-87-94.

26. Krishan, A.L. (2011). Diagrammnyi raschet prochnosti trubobetonykh kolonn. In S.N. Krivoshapko (Eds.) *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy – 2011»*: tez. dokl., Moskva, 05–08 apr. 2011 g. (79). Moscow: Ros. un-t druzhby narodov. (In Russ.).
27. Krishan, A.L., Troshkina, E.A. & Kuz'min, A.V. (2011). Predlozheniya po raschetu prochnosti trubobetonykh kolonn. *Vestn. Magnitogorskogo gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova*, 1(33), 66–69. (In Russ.).
28. Vedernikova, A.A. (2023). Sovershenstvovanie metodiki rascheta trubobetonykh elementov obratnym chislenno-analiticheskim metodom i ee primenenie. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 11(107), 437–449. (In Russ.).
29. Snigireva, V.A. & Gorynin, G.L. (2018). The nonlinear stress-strain state of the concrete-filled steel tube structures. *Magazine of Civil Engineering*, 83(7), 73–82. DOI: 10.18720/MCE.83.7
30. Tur, V.V. & Rak, N.A. (2003). *Prochnost' i deformatsii betona v raschetakh konstruksii: monogr.* Brest: BGТУ. (In Russ.).
31. Astankov K.Yu. (2023). Analiz sovremennykh podkhodov k proektirovaniyu i stroitel'stvu arochnykh mostov s ispol'zovaniem trubobetona [Analysis of modern approaches to the design and construction of arch bridges using tube-reinforced concrete]. *Internet-zhurnal «Transportnye sooruzheniya» [Russian Journal of Transport Engineering]*, 10(4). (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.15862/11SATS423.

Поступила 25.10.2024

NONLINEAR CALCULATION OF TUBULAR CONCRETE ELEMENTS DURING BENDING

D. LAZOUSKI¹⁾, D. GLUKHOV²⁾, A. KALTUNOU³⁾, A. KHATKEVICH⁴⁾
(^{1), 3), 4)} *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, ²⁾ *LLC «SoftClub», Minsk*)

The question of the applicability of a nonlinear deformation model for the calculation of bent tubular concrete elements with round pipes is considered. A criterion for the destruction of a bent tubular concrete element without limiting concrete deformations during compression is proposed. The advantage of this failure criterion is the possibility of taking into account a high degree of redistribution of forces in the cross section of the bent tubular concrete element after the pipe steel reaches the yield strength and there is no need to normalize the ultimate compressibility of concrete. The results of the nonlinear calculation of the limiting force are compared with experimental data from the formed sample of studies. The applicability of the nonlinear calculation is confirmed, taking into account the authors' proposals for tubular concrete elements with round pipes during bending to calculate the moment corresponding to the beginning of the flow of pipe steel.

Keywords: pipe concrete element, nonlinear deformation model, deformation diagrams, fracture criterion.