УДК 624.134.4
DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-4-70-86

© *Р. А. Мангушев*[1,2], д-р техн. наук, профессор
© *А. И. Осокин*[1], д-р техн. наук, доцент
© *В. М. Полунин*[1,2], канд. техн. наук, доцент
© *И. Б. Башмаков*[1,2], канд. техн. наук, ст. преподаватель
© *И. Д. Куляшов*[1], магистрант
© *О. О. Денисова*[1], канд. техн. наук, доцент
([1]Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия;
[2]Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Россия)
E-mail: ramangushev@yandex.ru, geostroy-osokin@mail.ru, n1ce2u@yandex.ru, 179bib@gmail.com, kuliashov.ilya@yandex.ru, olgadenisova210886@yandex.ru

© *R. A. Mangushev*[1,2], Dr. Sci. Tech., Professor
© *A. I. Osokin*[1], Dr. Sci. Tech., Associate Professor
© *V. M. Polunin*[1,2], PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© *I. B. Bashmakov*[1,2], PhD in Sci. Tech., senior teacher
© *I. D. Kulyashov*[1], undergraduate
© *O. O. Denisova*[1], PhD in Sci. Tech., Associate Professor
([1]Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering St. Petersburg, Russia
[2]Research Institute of Building Physics of the RAACS (RIBP RAACS), Moscow, Russia)
E-mail: ramangushev@yandex.ru, geostroy-osokin@mail.ru, n1ce2u@yandex.ru, 179bib@gmail.com, kuliashov.ilya@yandex.ru, olgadenisova210886@yandex.ru

РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОРОК И СТАЛЬНЫХ ТРУБ В СОСТАВЕ КОНСТРУКЦИИ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА

CALCULATION AND OPTIMIZATION OF STRUTS AND STEEL PIPES AS PART OF AN EXCAVATION SUPPORT SYSTEM

Проведен комплексный анализ несущей способности стальных распорных труб (диаметры 530, 630, 1020 мм, толщины стенок 8 и 10 мм) с учетом пластических деформаций материала. Построены изополя коэффициентов использования в зависимости от длины и усилия. Верификация методом конечных элементов в Ansys подтвердила высокую сходимость с аналитическими расчетами. Методом нормализации и полиномиальной аппроксимации Лагранжа предложена система уравнений для быстрой проверки прочности и устойчивости распорной конструкции. В качестве практического примера приведена оптимизация распорной системы котлована на основе расчетов методом конечных элементов в PLAXIS.

Ключевые слова: ограждение котлована, распорный элемент, котлован, численное моделирование.

A comprehensive analysis of the load-bearing capacity of steel strut pipes (diameters 530, 630, 1020 mm, wall thickness 8 and 10 mm) was carried out, taking into account the material's plastic deformations. Isofields of utilization factors were constructed as functions of length and applied force. Verification using the finite element method in Ansys confirmed a high level of convergence with analytical calculations. A system of equations for rapid assessment of strength and stability of the strut structure was proposed using normalization and Lagrange polynomial approximation. As a practical example, the optimization of an excavation bracing system based on finite element calculations in PLAXIS is presented.

Keywords: excavation support, strut element, excavation, numerical modeling.

Введение

Современное городское и промышленное строительство, характеризующееся высокой плотностью застройки и активным возведением заглубленных сооружений, предъявляет повышенные требования к геотехническому проектированию. Одной из ключевых задач в этой области является обеспечение

устойчивости ограждений котлованов, где одним из важнейших конструктивных элементов выступает распорная система. Эта система, воспринимающая нагрузки от активного давления грунта, по своей сути является геотехнической конструкцией, и ее расчет должен выполняться специалистами-геотехниками.

Однако существующая нормативная база предъявляет к распорным конструкциям, в частности к стальным трубам, обширный перечень проверок (на прочность, общую и местную устойчивость), разработанных преимущественно с позиции расчета металлических конструкций [1–3]. Это создает методический диссонанс: инженеры-геотехники, выполняющие прежде всего расчеты массива грунта, вынуждены действовать как расчетчики металлоконструкций, привлечение же инженеров-проектировщиков металлических конструкций для этой типовой операции нецелесообразно.

Сложившаяся ситуация усугубляется итерационной природой проектирования: инженер вынужден последовательно, методом проб и ошибок, подбирать сечение, удовлетворяющее всем нормативным критериям, что делает процесс трудоемким и длительным [4].

В связи с этим развитие методов расчета распорок требует создания специализированных упрощенных процедур для данного типа конструкций — горизонтальных условно центрально сжатых стоек. Разработка таких методов, адаптированных для использования инженерами-геотехниками в рамках их основной деятельности, позволит исключить многократные трудоемкие пересчеты и сосредоточиться на решении геотехнических задач [5–12]. Настоящее исследование направлено на разработку подобного подхода.

Методы

Методы проектирования распорных систем в составе ограждений котлованов

Основные расчетные предпосылки можно представить следующим образом (СП 16.13330.2017, ГОСТ 27752–2014, СП 20.13330.2016):

1) материал труб: сталь марки 09Г2С, соответствующая ТУ 14-161-184–2000, с нормативным сопротивлением по пределу текучести R_{yn} = 31,5 кН/см^2 и коэффициентом надежности по материалу γ_m = 1,0;

2) уровень ответственности: нормальный (КС-2) с соответствующим коэффициентом надежности по ответственности γ_n = 1,0;

3) коэффициент условий работы: γ_c = 1,0;

4) нагрузки: продольное усилие N задавалось как внешний параметр, имитирующий усилие от раскрепления ограждения котлована. Кроме этого учитывалось влияние собственного веса элемента, вызывающее поперечную силу $Q(L, A)$ и изгибающий момент $M(L, A)$ как функции от длины L элемента и площади его поперечного сечения A при постоянном удельном весе стали γ_{st} = 78,5 кН/м^3:

$$\begin{cases} Q(L,A) = \dfrac{\gamma_{st} \cdot A \cdot L}{2} \\ M(L,A) = \dfrac{\gamma_{st} \cdot A \cdot L^2}{2} \end{cases}; \quad (1)$$

5) температурные воздействия: в рамках данной параметрической модели не учитывается увеличение продольных усилий от температурных деформаций, регламентируемое приложением К СП 381.1325800.2018;

6) расчетная схема: в рамках проведенного исследования принята расчетная схема распорного элемента в виде горизонтального стержня с шарнирным закреплением по обоим концам с коэффициентом расчетной длины $\mu_{XOY(XOZ)}$ = 1,0 в двух плоскостях. Данное допущение является широко применяемым в практике расчета распорных систем ограждений котлованов (рис. 1).

Методы выполнения множественных аналитических расчетов распорок из стальных труб

С целью комплексного подхода к исследованию и детального анализа поведения распорных элементов в широком диапазоне геометрических и силовых параметров был выполнен множественный сеточный рас-

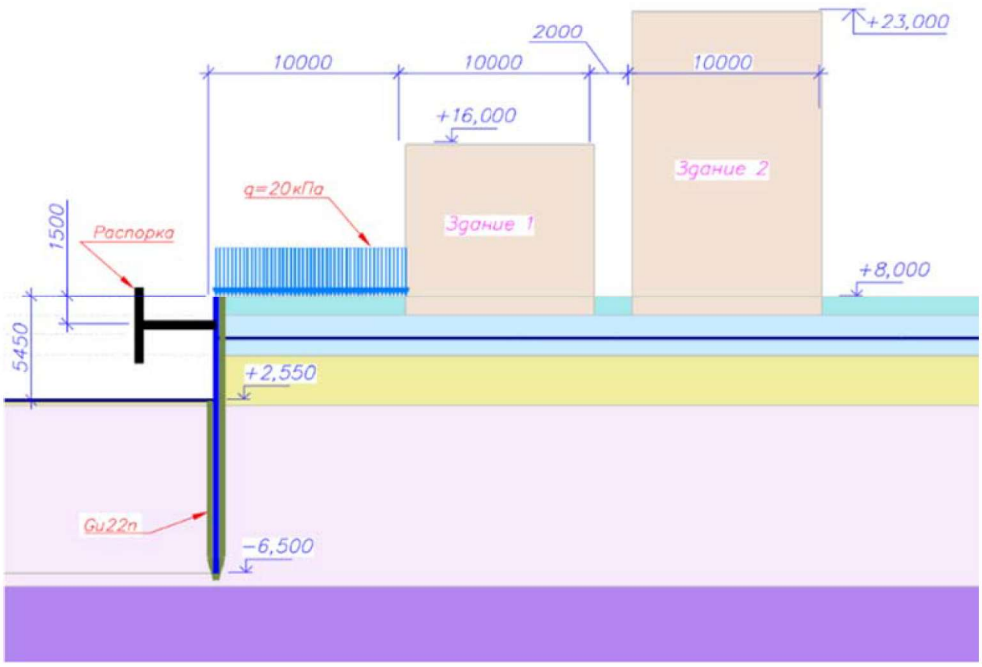


Рис. 1. Схема к расчету прочности и устойчивости конструкции котлована по 1-й группе предельных состояний в программном комплексе PLAXIS 2D

чет. Методология исследования заключалась в последовательном вычислении коэффициента использования для каждого сочетания длины распорного элемента и продольного усилия в заданной расчетной сетке.

Логика реализованного алгоритма расчета представлена на рис. 2.

Инициализация: расчет начинался с малых значений длины ΔL и усилия ΔN. Задавались счетчики для перебора по длине (i) и усилию (j).

Цикл по длине: для каждого i-го шага по длине ($L = i\Delta L$) выполнялся вложенный цикл по усилию ($N = j\Delta N$).

Цикл по усилию: для каждого j-го шага по усилию ($N = j\Delta N$) выполнялся расчет коэффициента использования $K_{исп}$ до тех пор, пока не будет выполняться условие $K_{исп} \geq 1$. Если условие считается истинным, то продольное усилие обнуляется к начальному значению ΔN и цикл возвращает приращение длины для перебора усилия ($N = j\Delta N$) по следующей ступени расчета.

Критерий остановки расчета: в каждой точке (L, ΔN) цикла при приращении длины производилась проверка условия $K_{исп} \geq 1$. Если условие выполнялось (т. е. несущая способность элемента была исчерпана за счет приращения длины $L = i\Delta L$), то расчет для текущей длины L прекращался и алгоритм завершал работу.

Методы численного моделирования работы распорок из стальных труб

Для анализа работы распорных элементов был использован метод конечных элементов в программном комплексе Ansys. Расчетная модель трубчатого элемента была реализована с использованием четырехугольных оболочечных конечных элементов типа Shell. Данный тип элементов обеспечивает корректное описание работы тонкостенных конструкций[1] [13–18].

Моделирование механического поведения материала выполнено в рамках упругопластической постановки. Для стали задана билинейная диаграмма деформирования,

[1] EN 1993-1-5:2006. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-5: Plated structural elements. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2006.

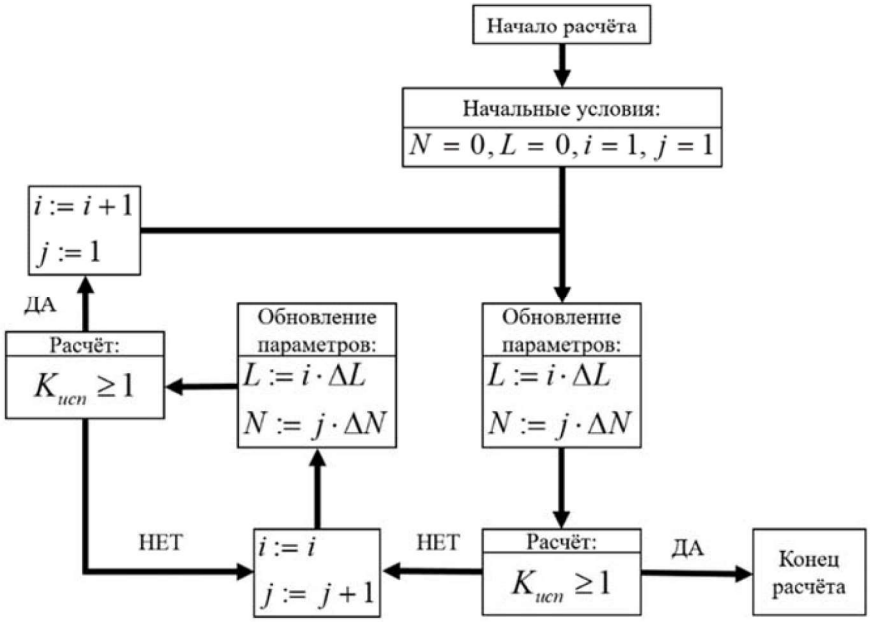


Рис. 2. Блок-схема множественного сеточного расчета распорного элемента

учитывающая пластические свойства материала. Прочностные и деформационные характеристики материала были скорректированы с учетом соответствующих коэффициентов условий работы, надежности по материалу и ответственности, описанных ранее (ТКП — Технический кодекс установившейся практики, EN 1993-1-1–2009).

Для исключения завышенной несущей способности, характерной для расчетов идеализированных оболочечных конструкций, в модель было введено геометрическое несовершенство [11–17]. В качестве начального дефекта принята форма синусоиды, при этом аппроксимация искривленной образующей выполнялась по синусоидальному закону с полной длиной волны, с разбивкой минимум на шесть частей по длине дефекта z согласно (2)–(4):

$$l = \frac{\pi\sqrt{\frac{D-S}{2}S}}{\sqrt[4]{12\left(1-\nu^2\right)}}; \quad (2)$$

$$\omega(z) = a \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{l}\right); \quad (3)$$

$$a = l \cdot \beta, \quad (4)$$

где ν — коэффициент Пуассона; l — длина половины синусоиды дефекта, мм; α — амплитуда начального искривления оболочки, мм; β — характеристика величины несовершенства, принимаемая равной в среднем 0,005 [9].

Методика определения предельного усилия включала трехэтапный расчет согласно следующим блокам (рис. 3):

1. Static Sructural_1: определение опорного напряженно-деформированного состояния распорного элемента под действием собственного веса трубы и продольного усилия, возникающего от давления грунта на гибкую подпорную стенку. Полученные изополя напряжений и перемещений характеризуют начальные условия в рамках последующего анализа.

2. Eigenvalue Buckling: оценка критических нагрузок и форм потери устойчивости. Определение наиболее опасной (первой) моды потери устойчивости (рис. 4), которая задает форму начальных несовершенств для нелинейного расчета.

3. Static Sructural_2: нелинейный анализ устойчивости с учетом геометрических

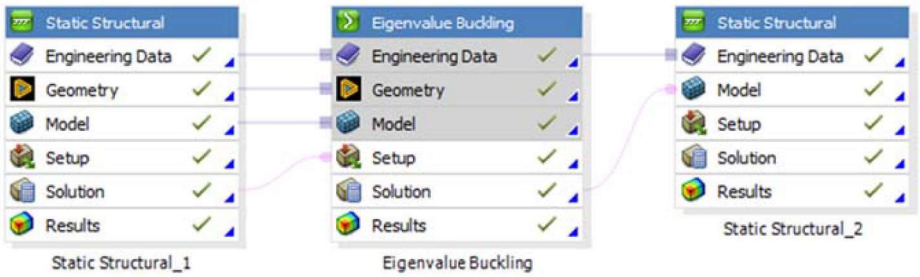


Рис. 3. Общая блок-схема типового расчета труб на прочность и устойчивость в Ansys Workbench

несовершенств. Нагружение осуществлялось путем заданного перемещения опоры с постоянной скоростью деформирования (рис. 5).

Результаты

Визуализация результатов (см. рис. 4, 5) наглядно демонстрирует формы потери устойчивости и пространственное распределение эквивалентных напряжений Мизеса в момент исчерпания несущей способности распорного элемента. Наблюдаемая картина свидетельствует о существенно нелинейном характере работы металлической трубы в системе ограждения котлована.

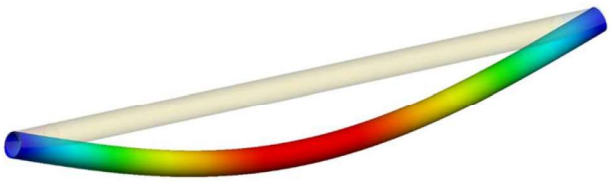


Рис. 4. Общая теоретическая схема потери устойчивости трубы 530×8 длиной 15 м (в увеличенном масштабе деформирования) по результатам модального анализа (для наиболее опасной 1-й моды) и недеформированное состояние

Результаты множественных аналитических расчетов распорных труб котлована

Итерационный подход позволил определить коэффициенты использования для каждого возможного сочетания длины и усилия (L, N) в допредельном состоянии $K_{исп} < 1$ и построить на их основе изополя в осях «длина распорного элемента–продольное усилие» (рис. 6).

Отметим три характерные особенности полученных изополей коэффициентов использования:

1. В зоне малых длин и значительных продольных усилий разрушение распорного элемента происходит по условию прочности (исчерпание несущей способности сечения) согласно формуле

$$K_1(N,D,S)=\frac{\sigma_x}{R_y}=\frac{N\cdot\gamma_n\cdot\gamma_m}{\pi\cdot S\cdot(D-S)\cdot R_{yn}\cdot\gamma_c}, \quad (5)$$

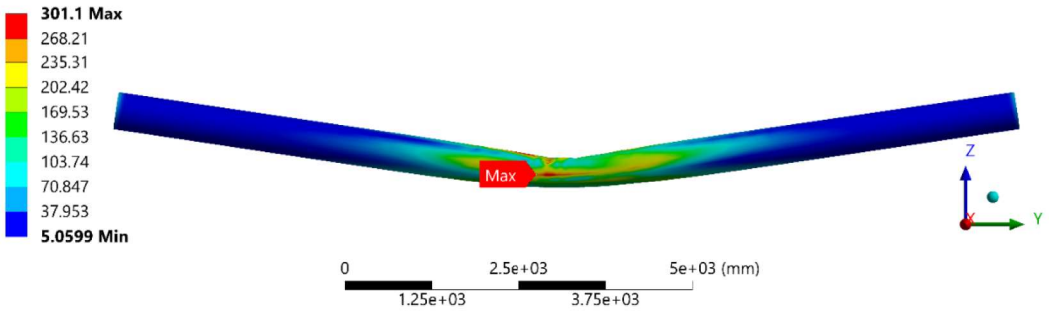


Рис. 5. Общая схема потери несущей способности трубы 530×8 длиной 15 м с изополями эквивалентных напряжений

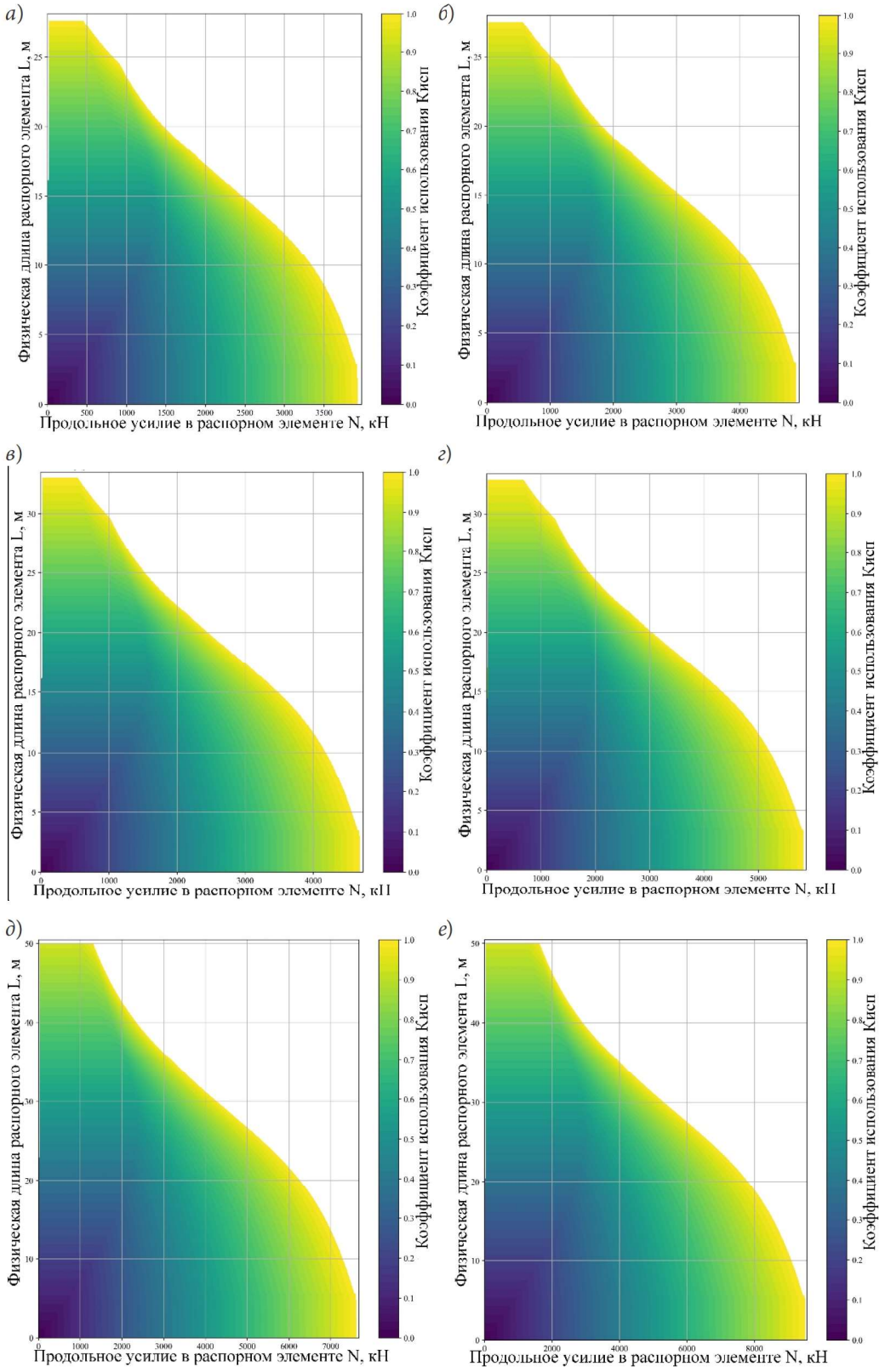


Рис. 6. Расчетные изополя коэффициентов использования ($К_{исп}$) в зависимости от длины распорного элемента (*L*, м) и продольного усилия (*N*, кН) для трубы размерами: *а* — 530×8; *б* — 530×10; *в* — 630×8; *г* — 630×10; *д* — 1020×8; *е* — 1020×10

где N — продольное усилие, кН; D — внешний диаметр поперечного сечения трубы, см; S — толщина стенки трубы, см.

2. В зоне больших длин и малых усилий в элементах преобладает проверка по гибкости элемента из условия гибкости

$$K_2\left(\mathrm{L},D,S\right)=\frac{\lambda_{XOY(XOZ)}}{\lambda_{ult_XOY(XOZ)}}=$$

$$=\frac{L\cdot\mu_{XOY(XOZ)}}{D\sqrt{1+\left(\frac{\left(D-2\cdot S\right)}{D}\right)^2}\left(45-15\cdot\alpha_{ult_XOY(XOZ)}\right)}, \quad (6)$$

где L — физическая длина распорного элемента, см; $\alpha_{ult_XOY(XOZ)}$ — коэффициент, принимаемый согласно табл. 32 СП 16.13330.2017.

3. В зоне умеренных длин и усилий решающую роль играет проверка на общую устойчивость. Плотное сгущение изолиний на графиках свидетельствует о высокой чувствительности к изменению геометрических параметров в этой области. Наиболее значимой в области поиска оптимальных решений является нелинейная часть графика с активным сгущением изолиний при выполнении проверок потери устойчивости элемента (рис. 7).

Анализ результатов позволяет установить, что в рамках рассматриваемой расчетной схемы распорка ограждения котлована работает в характерном для данного типа конструкций напряженно-деформированном состоянии. Коэффициент использования несущей способности элемента в первую очередь определяется двумя ключевыми параметрами: расчетной длиной трубы и величиной действующего продольного усилия. Установленная зависимость формирует основу для разработки упрощенной методики подбора сечений распорных элементов, позволяющей инженеру-геотехнику оптимизировать параметры в системе ограждающей конструкции котлована без проведения трудоемких итерационных расчетов.

Результаты сопоставления аналитического и численного расчетов

На каждом шаге перемещения опоры в расчетном блоке Static Sructural_2 в рам-

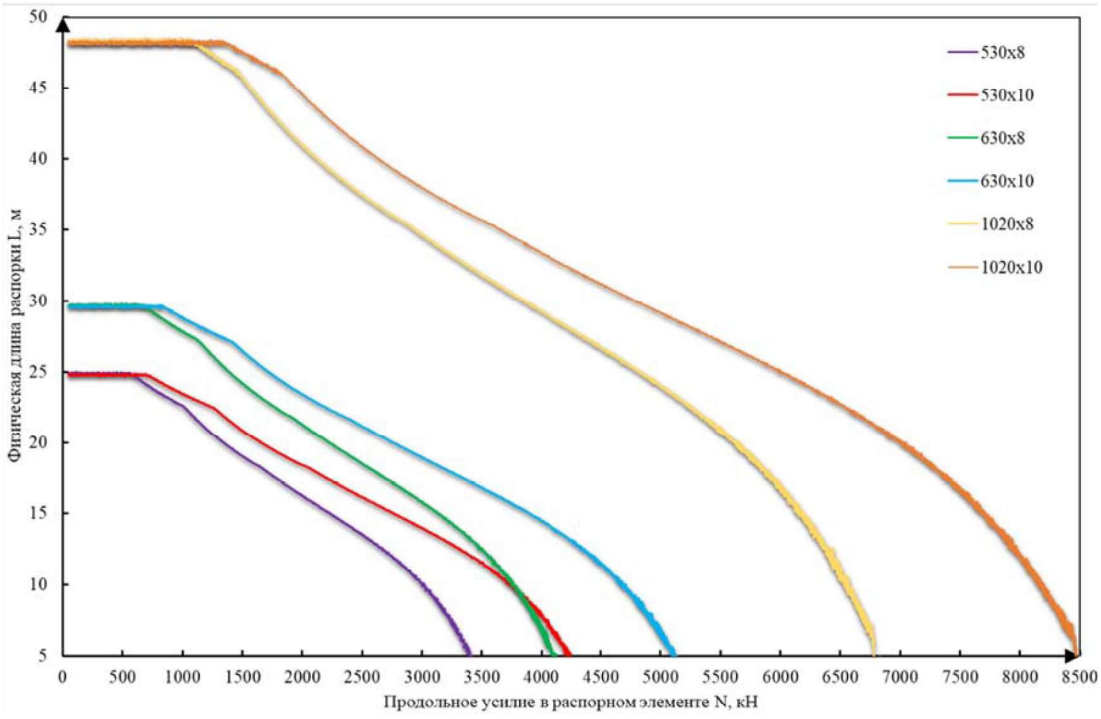


Рис. 7. Изолинии предложенных к рассмотрению сечений для $K_{исп}$ = 0,9

ках численного эксперимента определяются опорные реакции вдоль оси трубы в шарнирно-неподвижной опоре. Критерием достижения предельного состояния служит пик на графике зависимости опорной реакции от величины перемещения, после которого следует ее резкое падение (рис. 8), что соответствует потере несущей способности элемента распорной системы.

На представленных графиках (см. рис. 8) отображены расчетные зависимости «продольное усилие–перемещение», полученные в результате численного моделирования методом конечных элементов в Ansys для шести типов трубчатых распорных элементов с различными геометрическими характеристиками.

Введем замечание, что в рамках численного расчета целью является анализ напряженно-деформированного состояния металлического элемента ограждения котлована в допредельном состоянии, без учета реального поведения трубы за пределом прочности (проверка на возможные самопересечения в конечноэлементном расчете после потери несущей способности распорки не выполнялась с целью ускорения расчета).

Сравнительный анализ пиковых усилий наглядно демонстрирует адекватность применяемой численной методики и нормативных формул для оценки поведения распорных элементов вплоть до полного исчерпания их несущей способности (табл. 1).

Отметим, что максимальная погрешность расчета составляет 6,5 %, что говорит о высокой степени соответствия нормативной и численной методик.

Результаты разработки упрощенной инженерной методики расчета распорок из стальных труб

В связи с нелинейным характером зависимости $K_{исп}(N, L)$ и необходимостью учета множества взаимодействующих проверок поиск

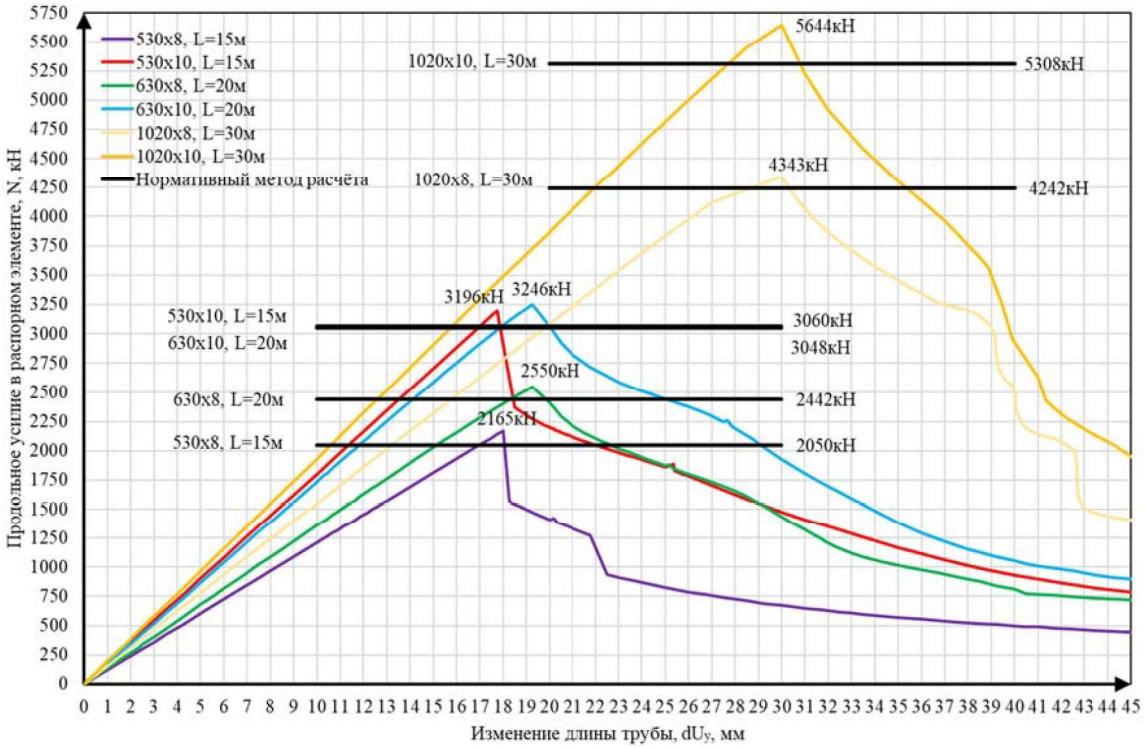


Рис. 8. Графики зависимости продольного усилия в трубах различных диаметров, толщин и длин от сжатия с нанесенными результатами нормативного метода расчета предельного усилия при тех же геометрических характеристиках для $K_{исп} = 1$

Таблица 1

Результаты аналитических и численных расчетов и их сопоставление

Основные параметры расчетных схем			Предельное продольное усилие при $K_{исп} = 1$, кН		Погрешность расчета, %
D, мм	*S*, мм	*L*, м	СП	Ansys	
530	8	15	2050	2165	5,61
530	10	15	3060	3196	4,43
630	8	20	2442	2550	4,42
630	10	20	3048	3246	6,53
1020	8	30	4242	4343	2,38
1020	10	30	5308	5644	6,34

точной аналитической функции в явном виде представляется затруднительным, как и расчет множества взаимосвязанных формул, особенно при типовой схеме нагружения распорного элемента котлована. В связи с этим был применен подход, основанный на нормировании переменных и последующей аппроксимации.

Применим стандартные методы аппроксимации графиков. Нормируем графики в двух осях согласно

$$N'(L') \quad \frac{N(L)}{N(L)_{\max_}}; \; j = i, \qquad (7)$$

где $N'(L')_j$ — нормированные координаты точек, кН (м); $N(L)_i$ — расчетные координаты каждой точки расчета при коэффициенте использования, равном 0,9 для каждого сочетания диаметров и толщин элементов, кН (м); $N(L)_{\max}$ — максимальное продольное усилие и длина элемента для каждого сочетания диаметров и толщин элементов, кН (м). Максимальное усилие определяется из условия (5), а максимальная длина — согласно (6).

Результат нормирования с использованием формулы (7) отражен на рис. 9.

Наглядно видно, что общий вид графиков в нормированных осях может быть описан одной кривой. Отметим, что согласно этому графику (см. рис. 9) влияние длины, равной 0,1 от максимальной, на коэффициент использования незначительно по сравнению с продольным усилием, как и влияние продольного усилия до 0,15 от максимального при значительных длинах элемента.

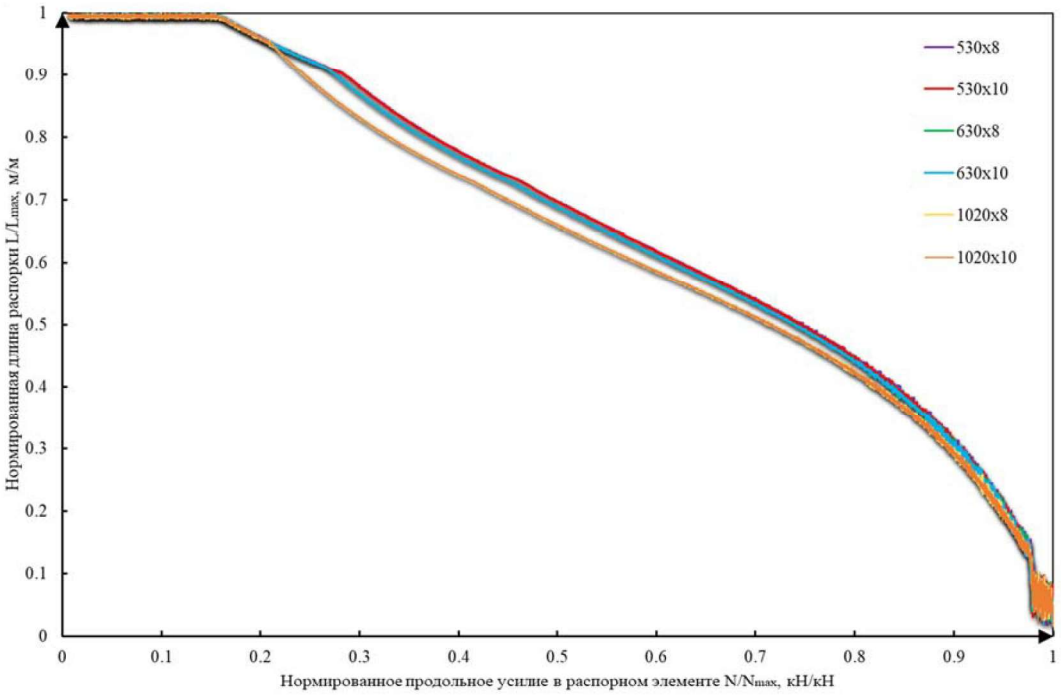


Рис. 9. Нормированные графики огибающих при $K_{исп} = 0{,}9$ для рассматриваемых труб

Применим аппроксимацию полиномом Лагранжа степени $m = 4$:

$$Y = W_0 + W_1 \cdot X + W_2 \cdot X^2 + W_3 \cdot X^3 + W_4 \cdot X^4 \quad (8)$$

или в существующих обозначениях:

$$L_{\text{Л}} = \sum_{m=0}^{4} W_m \left(\frac{N}{N(K_1)} \right)^m L(K_2), \quad (9)$$

где значения коэффициентов из условия минимизации суммы квадратов флуктуаций для нормированного графика записаны в табл. 2.

Полученные результаты аппроксимации в исходных осях (рис. 10) определяют высокую сходимость между аналитическими методами, регламентируемыми нормативной документацией, и аппроксимирующим уравнением. Однако для проверки корректности работы уравнения выполним расчет и аналогичное сравнение для контрольной выборки распорных труб диаметрами 1220 и 1420 мм с толщинами стенки 20 и 40 мм (рис. 11).

Основные статистические параметры для рассматриваемой выборки построения модели и контрольной выборки представлены в табл. 3.

Отметим, что медианная погрешность аппроксимации и средняя погрешность в рамках каждой выборки отличаются друг от друга в рамках 1,5 %, что говорит о равномерном распределении погрешности расчета по предложенной формуле.

Сделаем замечание, что контрольная выборка отображает незначительно бóльшую погрешность, что хоть и не отвергает возможность применения предложенного метода, однако требует развития темы в ча-

Таблица 2

Значения весовых коэффициентов к аппроксимирующему уравнению

Весовой коэффициент	W_0	W_1	W_2	W_3	W_4
Значение	1,086309	–0,090799	–4,083049	7,215892	–4,055408

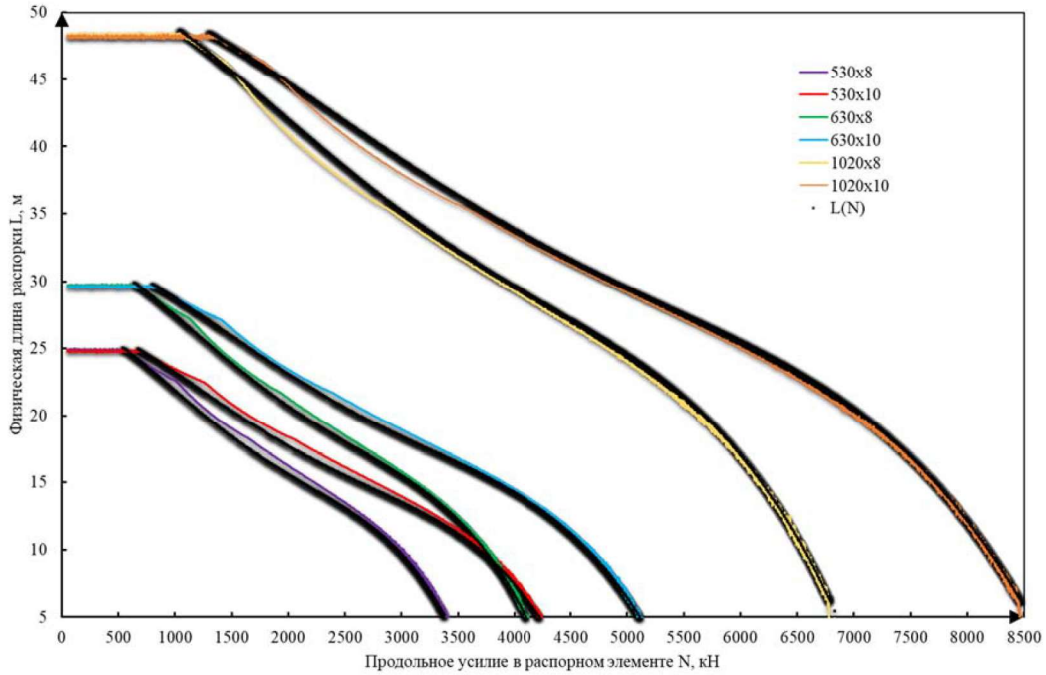


Рис. 10. Сопоставление результатов расчетов с аппроксимирующей формулой в исходных координатах

Таблица 3

Основные статистические параметры к аппроксимирующему уравнению в восстановленных координатах

Параметр	Уравнение к расчету	Значение	
		Выборка для построения модели	Контрольная выборка
Множественный коэффициент детерминации, безразмерный	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(L_{\text{пред},i} - \overline{L}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(L_i - \overline{L}\right)^2}$ (10)	0,9988	0,9584
Критерий Фишера, безразмерный	$F = \frac{R^2}{1-R^2}\cdot\frac{n-m}{m}$ (11)	3 780 598	1 436 725
Средняя относительная погрешность аппроксимации, %	$\overline{A} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\frac{\left\|L_{\text{пред},i} - L_i\right\|}{L_i}}{n}100\ \%$ (12)	2,35	4,18
Медиана относительной погрешности, %	$Me = A^*_{\frac{n+1}{2}}$ (13)	2,06	3,12

сти определения аналогичной формулы для большего сортамента труб.

Так, результаты в табл. 3 и на рис. 11 отображают высокую сходимость расчета, что позволяет увеличивать границы применимости предложенного уравнения (9) как для начальной выборки, так и для контрольной.

Итоговая система уравнений проверки распорки по материалу принимает вид:

$$\begin{cases} K_1\left(N', D', S'\right) \le 0{,}9 \\ K_2\left(L', D', S'\right) \le 0{,}9 \\ L' \le \sum_{m=0}^{4} W_m \left(\frac{N'}{N\left(K_1 = 0.9\right)}\right)^m \cdot L\left(K_2 = 0{,}9\right) \end{cases}, \quad (14)$$

где L' и N' — предполагаемая длина и расчетное усилие в элементе диаметром D' и толщиной стенки S'.

В рамках полученных результатов предлагается методика предварительного подбора сечений распорных элементов, включающая в себя следующий порядок расчета:

1. Из условия (5) определить максимальное предельное усилие в распорке для малых длин как

$$N \approx 1.05 \cdot 10^6 \cdot S\left(D - S\right). \quad (15)$$

2. Из условия (6) определить предельную длину распорки для малых усилий как

$$L \approx 30\sqrt{D^2 + \left(D - 2\cdot S\right)^2}. \quad (16)$$

3. Исходя из подобранных возможных усилий (15) и длин (16) провести проверку в точке из условия (14) согласно

$$\frac{L'}{L} \le W_0 + W_1\frac{N'}{N} + W_2\left(\frac{N'}{N}\right)^2 + W_3\left(\frac{N'}{N}\right)^3 + W_4\left(\frac{N'}{N}\right)^4, \quad (17)$$

где L' и N' — длина и расчетное усилие в распорном элементе диаметром D и толщиной стенки S; W_{0-4} — коэффициенты, принимаемые согласно табл. 2.

Результаты применения разработанной методики для подбора и оптимизации профилей стальных труб для распорной системы котлована

В качестве примера рассмотрена траншея глубиной H = 7 м с распорными элементами длиной L` = 15 м. Расчетная схема включает однородное грунтовое основание со следующими характеристиками: угол внутрен-

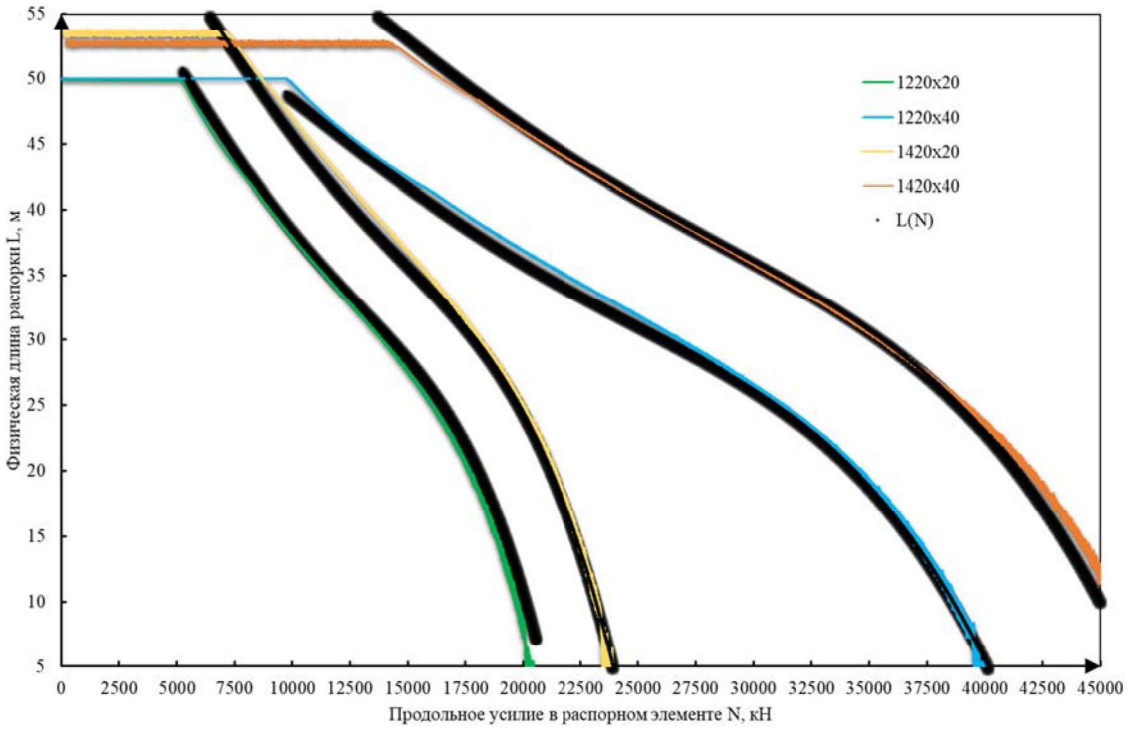


Рис. 11. Результаты сравнения аппроксимирующей формулы с контрольной выборкой

него трения 15°, удельное сцепление 10 кПа, удельный вес грунта 20 кН/м^3. Распорная система расположена на глубине 2,5 м при постоянном шаге труб 6 м. Для моделирования поведения грунтовой среды использована модель Hardening Soil (HS). Нагрузка по бровке котлована 20 кПа. Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 12.

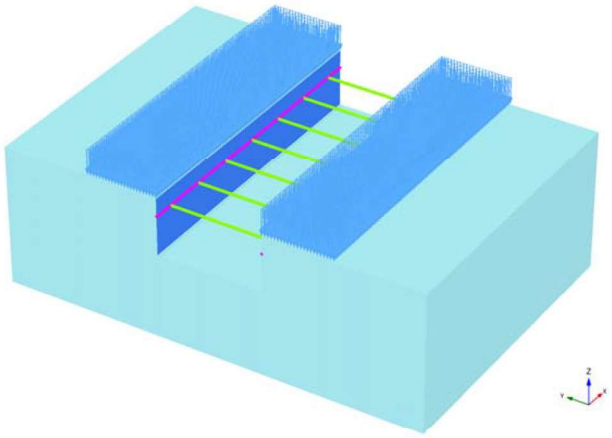


Рис. 12. Общий вид расчетной схемы

В первом расчетном приближении принято сечение распорных элементов в виде трубы 530×8 мм. Результаты расчета продольных усилий в элементах распорной системы представлены на рис. 13.

Проведем оценку предельного усилия и предельной длины для рассматриваемого сечения:

$$\begin{cases} N = 1,05\cdot 10^6 \dfrac{8}{1000}\left(\dfrac{530}{1000}-\dfrac{8}{1000}\right) = 4385 \text{ кН}, \\ L = 30\sqrt{\left(\dfrac{530}{1000}\right)^2+\left(\dfrac{530}{1000}-2\dfrac{8}{1000}\right)^2} = 22,149 \text{ м}, \\ L' = 15 \text{ м}, \\ N' = 3330 \text{ кН}. \end{cases} \quad (18)$$

Выполним проверку по предложенной формуле:

$$\frac{L'}{L} = 0,677 \le W_0 + W_1\frac{N'}{N} + W_2\left(\frac{N'}{N}\right)^2 + W_3\left(\frac{N'}{N}\right)^3 + W_4\left(\frac{N'}{N}\right)^4 = 0,480. \quad (19)$$

Так как условие не выполняется, сделаем второе расчетное приближение для попереч-

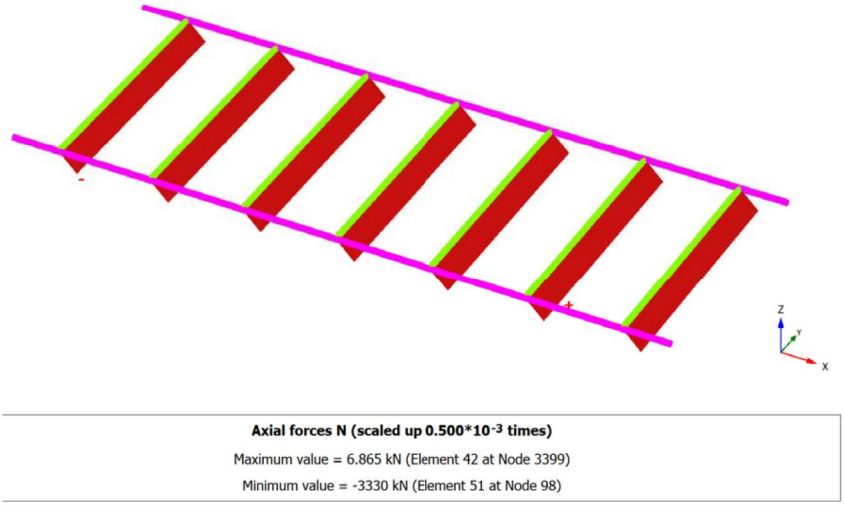


Рис. 13. Продольные усилия в элементах распорной системы из труб 530×8 в первом расчетном приближении. Максимальное (по модулю) продольное усилие составляет N` = 3330 кН

ного сечения распорных элементов с диаметром 630 мм и с толщиной стенки 10 мм. Выполним аналогичную проверку:

$$\begin{cases} N = 1{,}05 \cdot 10^6 \dfrac{10}{1000}\left(\dfrac{630}{1000} - \dfrac{10}{1000}\right) = 6510 \text{ кН}, \\ L = 30\sqrt{\left(\dfrac{630}{1000}\right)^2 + \left(\dfrac{630}{1000} - 2\dfrac{10}{1000}\right)^2} = 26{,}308 \text{ м}, \\ L' = 15 \text{ м}, \\ N' = 3330 \text{ кII}, \\ \dfrac{L'}{L} = 0{,}570 \le W_0 + W_1\dfrac{N'}{N} + W_2\left(\dfrac{N'}{N}\right)^2 + \\ + W_3\left(\dfrac{N'}{N}\right)^3 + W_4\left(\dfrac{N'}{N}\right)^4 = 0{,}663. \end{cases} \quad (20)$$

Условие выполняется — прочность и устойчивость распорной системы обеспечена. Актуализируем продольное усилие в распорной системе с учетом измененного поперечного сечения (рис. 14).

Удостоверимся в результатах подобранного сечения с учетом актуализированных продольных усилий:

$$\begin{cases} N = 1{,}05 \cdot 10^6 \dfrac{10}{1000}\left(\dfrac{630}{1000} - \dfrac{10}{1000}\right) = 6510 \text{ кН}, \\ L = 30\sqrt{\left(\dfrac{630}{1000}\right)^2 + \left(\dfrac{630}{1000} - 2\dfrac{10}{1000}\right)^2} = 26{,}308 \text{ м}, \\ L' = 15 \text{ м}, \\ N' = 3356 \text{ кН}, \\ \dfrac{L'}{L} = 0{,}570 \le W_0 + W_1\dfrac{N'}{N} + W_2\left(\dfrac{N'}{N}\right)^2 + \\ + W_3\left(\dfrac{N'}{N}\right)^3 + W_4\left(\dfrac{N'}{N}\right)^4 = 0{,}657. \end{cases} \quad (21)$$

Условие выполняется. В результате проведенного расчета определено, что из условия максимального коэффициента использования оптимальное поперечное сечение распорного элемента — 630×10 (см. рис. 6, *г*).

Разработанная методика автоматизирует итерационный процесс подбора параметров распорных элементов в рамках геотехнического расчета, что позволяет инженеру-геотехнику оперативно получать оптимальные значения сечений распорной системы. Полученные результаты служат надежной основой для последующей детальной проверки в соответствии с требованиями нормативной документации.

Выводы

1. Продольное усилие в распорных элементах системы ограждения котлована формируется в результате воздействия многочисленных взаимозависимых факторов.

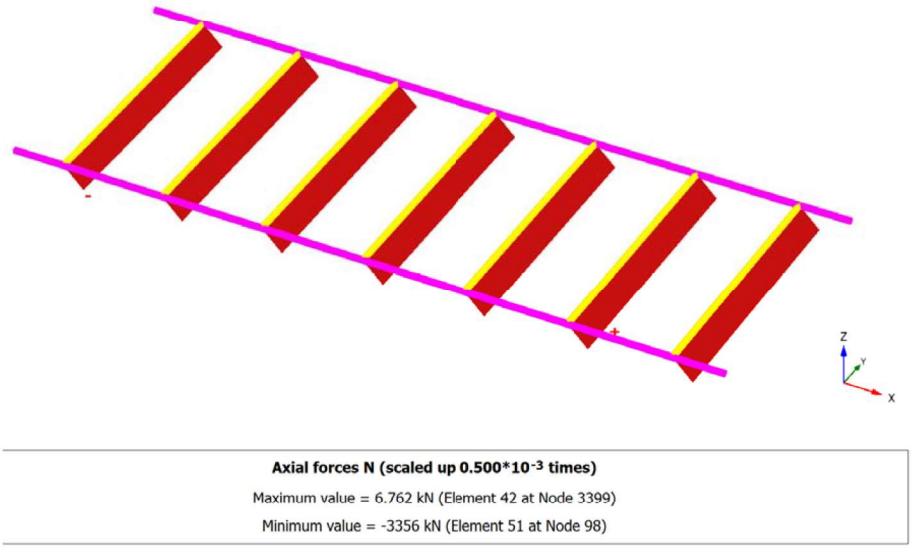


Рис. 14. Продольные усилия в элементах распорной системы из труб 630×10 во втором расчетном приближении. Максимальное (по модулю) продольное усилие составляет $N` = 3356$ кН

С целью их учета при разработке геотехнических решений необходимо применять итерационный подход с множеством нормативных проверок. Большое число факторов связано со значительными расчетными сложностями и определяет потребность в оптимизации существующих методов проектирования в части предварительного выбора сечений распорных элементов.

2. Для распорных элементов диаметрами 530, 630 и 1020 мм с толщиной стенок 8 и 10 мм построены подробные изополя коэффициентов использования в осях «длина распорного элемента–продольное усилие». Анализ полученных изополей позволил визуализировать и идентифицировать три характерные области, лимитирующие несущую способность: потерю прочности, общую устойчивость и предельную гибкость, что имеет важное значение для понимания механизма работы элемента в котловане.

3. Установлена высокая степень сходимости результатов аналитического расчета несущей способности стальных трубчатых распорок по существующей нормативной документации с результатами нелинейного численного моделирования в Ansys. Расхождение значений предельных усилий не превышает 6,5 % для всего рассматриваемого сортамента, что свидетельствует о сопоставимой точности как нормативных методик, так и примененного метода моделирования в конечно-элементном комплексе, учитывающем геометрические и физические нелинейности, а также начальные несовершенства стальных оболочек.

4. На основе методов математического анализа и полиномиальной аппроксимации предложена новая универсальная безразмерная зависимость (14), позволяющая с минимальной вычислительной нагрузкой производить проверку распорного элемента. Апробация методики на контрольной выборке показала ее репрезентативность — незначительный рост погрешности не отвергает предложенные формулы, а указывает на направление для их дальнейшего совершенствования.

5. Разработанная аппроксимирующая модель позволяет существенно упростить и ускорить процесс предварительного подбора сечений распорных труб в рамках геотехнического проектирования ограждающих конструкций котлованов.

6. В составе дальнейшего развития темы исследования целесообразно рассмотреть:

• масштабирование аппроксимирующих зависимостей для более широкого сортамента труб и сталей;

• создание интерактивных номограмм или программных модулей для интегрирования в CAD-системы;

• проведение исследований с учетом истинной жесткости узлов сопряжения распорных элементов с ограждением.

Библиографический список

1. *Ведяков И. И., Конин Д. В., Олуромби А. Р.* К вопросу об использовании электросварных прямошовных труб из сталей повышенной прочности в строительных металлических конструкциях // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 3 (18). С. 102–112.

2. Рекомендации по проектированию стальных конструкций с применением круглых труб / сост. Б. Н. Решетников, Б. С. Цетлин; под рук. В. А. Балдина, С. А. Ильясевича. М.: ЦНИИС Госстроя СССР, 1973. 97 с.

3. *Ильясевич С. А., Соколовский П. И., Шейнфельд Н. М. и др.* Стальные конструкции из труб. Экспериментально-теоретические исследования: сб. ст. / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко; под ред. С. А. Ильясевича. М.: Стройиздат, 1973. 191 с.

4. *Чунюк Д. Ю., Толмачев Д. А.* Современные методики расчета котлованов. Преимущества применения вероятностных методов // Жилищное строительство. 2025. № 9. С. 42–46. DOI 10.31659/0044-4472-2025-9-42-46.

5. *Хритин И. В.* Влияние температурно-деформированного состояния распорной системы на дополнительные усилия в конструкциях ограждения котлованов // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 2 (67). С. 112–121. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-112-121.

6. *Мангушев Р. А., Бояринцев А. В., Русецкий А. А.* Сравнительный расчет ограждения котлованов методом шпунтовой стены и экранов жесткости // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 1 (66). С. 75–82. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-75-82.

7. *Мангушев Р. А., Фадеев А. Б.* Учет расчетных параметров шпунтовых стен профиля «Ларсен» при проектировании ограждений котлованов // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017. Т. 13, № 4. С. 114–120. DOI 10.22337/2587-9618-2017-13-4-114-120.

8. *Мангушев Р. А., Осокин А. И., Сотников С. Н.* Геотехника Санкт-Петербурга. Опыт строительства на слабых грунтах. М.: АСВ, 2018. 386 с.

9. *Мангушев Р. А.* Применение современных конструктивных и технологических методов для устройства подземного пространства в г. Санкт-Петербурге // Геотехника. 2010. № 2. С. 58–67.

10. *Мангушев Р. А., Лашкова Е. Б., Смоленков В. Ю., Зайцев М. А.* Опыт сооружения подземных паркингов в условиях слабых грунтов Санкт-Петербурга // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5 (52). С. 91–100.

11. *Мангушев Р. А., Осокин А. И., Гарнык Л. В.* Опыт сохранения соседних зданий при устройстве котлованов больших объемов в условиях плотной застройки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. № 5. С. 2–7.

12. *Мангушев Р. А., Денисова О. О.* Влияние технологического воздействия изготовления горизонтальной диафрагмы методом jet-grouting на ограждение котлована типа «стена в грунте» // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 25–31. DOI 10.31659/0044-4472-2022-9-25-31.

13. *Броуде Б. М.* Об устойчивости несовершенных цилиндрических оболочек при осевом сжатии // Строительная механика и расчет сооружений. 1967. № 5. С. 36–40.

14. *Мануйлов Г. А., Бегичев М. М.* О начальном послекритическом равновесии продольно сжатой круговой цилиндрической оболочки и минимальном энергетическом барьере // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 58–69.

15. *Мануйлов Г. А., Бегичев М. М.* О механизме потери устойчивости круговой продольно сжатой цилиндрической оболочки // Современные проблемы механики, энергоэффективность сооружений и ресурсосберегающие технологии: сб. тр. научной школы-семинара молодых ученых и студентов с междунар. участием. Москва, 15–17 сентября 2015 г. М.: РУДН, 2015. С. 82–92.

16. *Ермаков А. М.* Об устойчивости цилиндрической оболочки при осевом сжатии с использованием неклассических теорий оболочек // Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2012. № 4. С. 81–86.

17. *Трушин С. В., Иванов С. А.* Численное исследование устойчивости пологой цилиндрической оболочки с учетом физической и геометрической нелинейностей при различных граничных условиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2011. № 5 (238). С. 43–46.

18. *Aljawi A. A. N.* Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes // Journal of King Abdulaziz

University-Engineering Sciences. 2002. Vol. 14 (2). Pp. 103–117.

References

1. Vedyakov I. I., Konin D. V., Olurombi A. R. *K voprosu ob ispol'zovanii elektrosvarnykh pryamoshovnykh trub iz staley povyshennoy prochnosti v stroitel'nykh metallicheskikh konstruktsiyakh* [On the use of electrically welded longitudinal seam pipes made of high-strength steels in building metal structures]. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo» – Bulletin of the Research Center "Construction"*, 2018, no. 3 (18), pp. 102–112.

2. *Rekomendatsii po proektirovaniyu stal'nykh konstruktsiy s primeneniem kruglykh trub* [Recommendations for the design of steel structures using round pipes]. Compiled by Reshetnikov B. N., Tsetlin B. S.; directed by Baldin V. A., Il'yasevich S. A. Moscow, TsNIIS Gosstroya SSSR Publ., 1973, 97 p.

3. Il'yasevich S. A., Sokolovskiy P. I., Sheynfel'd N. M., et al. *Stal'nye konstruktsii iz trub. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya* [Steel structures made of pipes. Experimental and theoretical studies]. Proceedings of the TsNIISK named after V. A. Kucherenko; ed. by Ilyasevich S. A. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973, 191 p.

4. Chunyuk D. Yu., Tolmachev D. A. *Sovremennye metodiki rascheta kotlovanov. Preimushchestve primeneniya veroyatnostnykh metodov* [Modern methods for calculating pits. Advantage of using probabilistic methods]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2025, no. 9, pp. 42–46. DOI 10.31659/0044-4472-2025-9-42-46.

5. Khritin I. V. *Vliyanie temperaturno-deformirovannogo sostoyaniya raspornoy sistemy na dopolnitel'nye usiliya v konstruktsiyakh ograzhdeniya kotlovanov* [Influence of the temperature-deformed state of the spacer system on additional forces in the structures of pit fencing]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers,* 2018, no. 2 (67) , pp. 112–121. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-2-112-121

6. Mangushev R. A., Boyarintsev A. V., Rusetskiy A. A. *Sravnitel'niy raschet ograzhdeniya kotlovanov metodom shpuntovoy steny i ekranov zhestkosti* [Equal calculation of pit fencing by sheet pile wall and stiffening screens method]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers,* 2018, no. 1 (66), pp. 75–82. DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-75-82.

7. Mangushev R. A., Fadeev A. B. *Uchet raschetnykh parametrov shpuntovykh sten profilya «Larsen» pri proektirovanii ograzhdeniy kotlovanov* [Calculation of design parameters of sheet piling walls of Larsen profile during design of pit fences]. *Mezhdunarodniy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitel'nykh konstruktsiy – International Journal for the Calculation of Civil and Building Structures*, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 114–120. DOI 10.22337/2587-9618-2017-13-4-114-120.

8. Mangushev R. A., Osokin A. I., Sotnikov S. N. *Geotekhnika Sankt-Peterburga. Opyt stroitel'stva na slabykh gruntakh* [Geotechnics of St. Petersburg. Construction experience on weak soils]. Moscow, ASV Publ., 2018, 386 p.

9. Mangushev R. A. *Primenenie sovremennykh konstruktivnykh i tekhnologicheskikh metodov dlya ustroystva podzemnogo prostranstva v g. Sankt-Peterburge* [Application of modern structural and technological methods for the construction of underground space in St. Petersburg]. *Geotekhnika – Geiengineering*, 2010, no. 2, pp. 58–67.

10. Mangushev R. A., Lashkova E. B., Smolenkov V. Yu., Zaytsev M. A. *Opyt sooruzheniya podzemnykh parkingov v usloviyakh slabykh gruntov Sankt-Peterburga* [Experience in the construction of underground parking lots in conditions of weak soils of St. Petersburg]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers,* 2015, no. 5 (52), pp. 91–100.

11. Mangushev R. A., Osokin A. I., Garnyk L. V. *Opyt sokhraneniya sosednikh zdaniy pri ustroystve kotlovanov bol'shikh ob"emov v usloviyakh plotnoy zastroyki* [Experience in preserving neighboring buildings when arranging large-volume pits in dense building conditions]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, foundations and soil mechanics*, 2016, no. 5, pp. 2–7.

12. Mangushev R. A., Denisova O. O. *Vliyanie tekhnologicheskogo vozdeystviya izgotovleniya gorizontal'noy diafragmy metodom jet-grouting na ograzhdenie kotlovana tipa «stena v grunte»* [Influence of technological impact of horizontal diaphragm manufacturing by jet-grouting method on "wall in soil" type pit enclosure]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction,* 2022, no. 9, pp. 25–31. DOI 10.31659/0044-4472-2022-9-25-31.

13. Broude B. M. *Ob ustoychivosti nesovershennykh tsilindricheskikh obolochek pri osevom szhatii* [On the stability of imperfect cylindrical shells under axial compression]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction mechanics and calculation of structures*, 1967, no. 5, pp. 36–40.

14. Manuylov G. A., Begichev M. M. *O nachal'nom poslekriticheskom ravnovesii prodol'no szhatoy krugovoy tsilindricheskoy obolochki i minimal'nom energeticheskom bar'ere* [On the initial post-critical equilibrium of a longitudinally compressed circular cylindrical shell and a minimum energy barrier]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy – Construction mechanics of engineering facilities and structures,* 2017, no. 1, pp. 58–69.

15. Manuylov G. A., Begichev M. M. *O mekhanizme poteri ustoychivosti krugovoy prodol'no szhatoy tsilindricheskoy obolochki* [On the mechanism of stability loss of a circular longitudinally compressed cylindrical shell]. *Sovremennye problemy mekhaniki, energoeffektivnost' sooruzheniy i resursosberegayushchie tekhnologii. Trudy nauchnoy shkoly-seminara molodykh uchenykh i studentov s mezhdunar. uchastiem. Moskva, 15–17 sentyabrya 2015 g.* [Modern problems of mechanics, energy efficiency of structures and resource-saving technologies. Proceedings of the scientific school-seminar of young scientists and students with international participation. Moscow, September 15-17, 2015]. Moscow, RUDN Publ., 2015, pp. 82–92.

16. Ermakov A. M. *Ob ustoychivosti tsilindricheskoy obolochki pri osevom szhatii s ispol'zovaniem neklassicheskikh teoriy obolochek* [On the stability of the cylindrical shell under axial compression using non-classical theories of shells]. *Vestnik SPbGU – Bulletin of St. Petersburg State University*, Ser. 1, 2012, no. 4, pp. 81–86.

17. Trushin S. V., Ivanov S. A. *Chislennoe issledovanie ustoychivosti pologoy tsilindricheskoy obolochki s uchetom fizicheskoy i geometricheskoy nelineynostey pri razlichnykh granichnykh usloviyakh* [An enumerated study of the stability of a flat cylindrical shell, taking into account physical and geometric nonlinearities under various boundary conditions]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Construction Mechanics and Calculation of Structures,* 2011, no. 5 (238), pp. 43–46.

18. *Aljawi A. A. N.* Numerical Simulation of Axial Crushing of Circular Tubes. *Journal of King Abdulaziz University-Engineering Sciences*, 2002, vol. 14 (2), pp. 103–117.