

**USE OF GLASS-COMPOSITE REINFORCEMENT
FOR PRODUCING SQUARE-SECTIONED PILES***Yu.Yu. Kuryatnikov**Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The possibility of using glass-fiber reinforced concrete in the design of square-section pile driving is considered. The results of experimental driving of piles reinforced with composite reinforcement are presented. It has been established that piles reinforced with composite reinforcement do not differ in their properties in the working position from piles reinforced with steel reinforcement. The dependence of the maximum allowable force on its orientation during pile driving has been established. The economic effect of replacing steel reinforcement with composite reinforcement has been determined, resulting in a decrease in the cost of the final product.

Keywords: driving piles, fiberglass reinforcement, strength and crack resistance tests, three-point bending.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yuri Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. Use of glass-composite reinforcement for producing square-sectioned piles // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 11–17.

УДК 624.075**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ
СЖАТО-ИЗОГНУТОЙ КОЛОННЫ НА ЕЕ УСТОЙЧИВОСТЬ***С.Л. Субботин, Т.Р. Баркая, А.В. Пронина**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Пронина А.В., 2025

Аннотация. В статье представлено сопоставление расчетов сжато-изогнутой ступенчатой колонны промышленного здания по методике СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» и по модели, учитывающей деформирование колонны методами теории устойчивости в строительной механике.

Ключевые слова: колонна промышленного здания, устойчивость, внецентренное сжатие, деформационный расчет.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-17-25

Расчет ступенчатой колонны (рис. 1) по нормативной методике выполняется в соответствии с принципами СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» [1]. Он основан на определении коэффициентов расчетной длины сжатых стержней по модели центрально сжатого стержня. Учет действия изгибающих моментов и поперечной нагрузки производится с помощью дополнительных коэффициентов и таблиц. Сначала определяются расчетные длины участков колонн, затем выполняется проверка устойчивости с учетом внецентренности приложения крановой нагрузки и горизонтальной тормозной нагрузки.

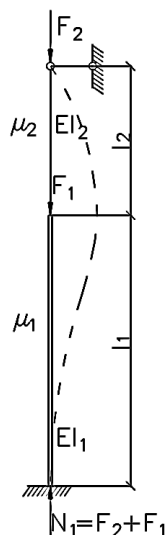


Рис. 1. Расчетная схема колонны (составлено авторами)

В программно-вычислительном комплексе (ПВК) SCAD Office была создана расчетная модель деформационного отсека промышленного здания [2]. Из ее расчета были получены исходные данные, необходимые для вычислений по СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»: $F_1 = 73,83$ т; $F_2 = 45,9$ т; $l_1 = 9,41$ м; $l_2 = 6,47$ м; $EI_1 = 8\,337$ тм² (двутавр широкополочный по ГОСТ 26020-83 40Ш2); $A_1 = 141,6$ см²; $EI_2 = 6\,416$ тм² (двутавр широкополочный по СТО АСЧМ 20-93 40Ш1); $A_2 = 112,91$ см²; $T = 1,52$ т; $e = 1,1$ м.

Вертикальная нагрузка для первого и второго участка колонны (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} N_1 &= F_1 + F_2 = 73,83 + 45,90 = 119,73 \text{ т;} \\ N_2 &= F_2 = 45,9 \text{ т.} \end{aligned} \quad (1)$$

Определение коэффициентов расчетной длины μ_1 первого и второго участков колонны выполняется через μ_{11} и μ_{12} по табл. И.3 приложения СП 16.13330.2017 [1] «Коэффициенты расчетной длины для одноступенчатых колонн с неподвижным шарнирно-опертым верхним концом» в зависимости от $\frac{l_2}{l_1} = 0,688$ и $\frac{l_2}{l_1} = 0,770$ методом интерполяции (рис. 2):

$$\begin{aligned} \mu_{11} &= 0,815 \text{ – величина } \mu_1 \text{ при } F_2 = 0; \\ \mu_{12} &= 1,400 \text{ – величина } \mu_1 \text{ при } F_1 = 0. \end{aligned}$$

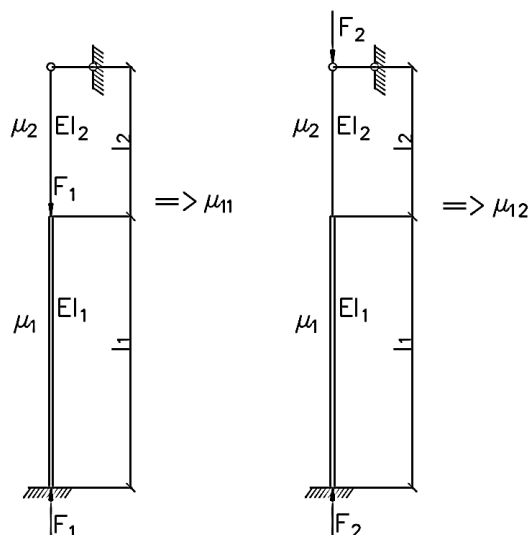


Рис. 2. Расчетные схемы для определения коэффициентов расчетной длины по табл. И.3 [1] (составлено авторами)

Расчет на прочность сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) колонн из стали с нормативным сопротивлением $R_{yn} = 306,5 \text{ Н/мм}^2 \leq 440 \text{ Н/мм}^2$, которые не подвергаются непосредственному воздействию динамических нагрузок (при напряжениях $\tau < 0,5R_s$ и $\sigma = N/A_n > 0,1R_y$), выполняют только при значении приведенного относительного эксцентриситета $m_{ef} > 20$ и отсутствии ослабления сечения.

Расчет на устойчивость для верхнего участка с учетом выражения (1) при $N_2 = F_2 = 45,9 \text{ т}$ выглядит следующим образом:

$$i_2 = \sqrt{\frac{J_2}{A_2}} = \sqrt{\frac{E J_2}{E A_2}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 416}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 112,91 \cdot 10^{-4}}} = 0,164; \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{\mu_2 l_2}{i_2} = \frac{3,0 \cdot 6,47}{0,164} = 118,354; \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_2 = \lambda_2 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 118,354 \sqrt{\frac{3 \cdot 250}{2,1 \cdot 10^6}} = 4,656; \quad (4)$$

$$m_2 = \frac{\epsilon A_2}{W_{c2}} = \frac{(1,1 \cdot 100) \cdot 112,91}{1 \cdot 595,61} = 7,784 \Rightarrow 5 < m_2 \leq 20. \quad (5)$$

Для профиля 40Ш1

$$\frac{A_{f2}}{A_{w2}} = \frac{(299 \cdot 12,5)}{(383 - 12,5 \cdot 2) \cdot 9,5} = 1,099 > 1; \quad (6)$$

$$\Rightarrow \eta_2 = 1,4 - 0,02 \bar{\lambda}_2 = 1,4 - 0,02 \cdot 4,656 = 1,307; \quad (7)$$

$$m_{ef2} = \eta_2 m_2 = 1,307 \cdot 7,784 = 10,174. \quad (8)$$

При $\bar{\lambda}_2 = 4,656$ и $m_{ef2} = 10,174$ по табл. Д.3 СП 16.133330.2017 $\rightarrow \varphi_{e2} = 0,091$.

Условие устойчивости выполняется:

$$\frac{N_2}{\varphi_{e2} A_2 R_y \gamma_c} = \frac{(45,9 \cdot 1 \cdot 000)}{0,091 \cdot 112,91 \cdot 3 \cdot 250 \cdot 1} < 1. \quad (9)$$

Расчет на устойчивость для нижнего участка аналогичен формулам (1)–(9):

$$N_1 = F_1 + F_2 = 73,83 + 45,90 = 119,73 \text{ т};$$

$$i_1 = \sqrt{\frac{J_1}{A_1}} = \sqrt{\frac{E J_1}{E A_1}} = \sqrt{\frac{8\,337}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 141,6 \cdot 10^{-4}}} = 0,167;$$

$$\lambda_1 = \frac{\mu_1 l_1}{i_1} = \frac{1,211 \cdot 9,41}{0,167} = 68,237;$$

$$\bar{\lambda}_1 = \lambda_1 \sqrt{\frac{R_y}{E}} = 68,237 \sqrt{\frac{3\,250}{2,1 \cdot 10^6}} = 2,684;$$

$$m_1 = \frac{e A_1}{W_{c1}} = \frac{(1,1 \cdot 100) \cdot 141,6}{2\,025,51} = 7,690 \Rightarrow 5 < m_1 \leq 20.$$

Для профиля 40Ш2

$$\frac{A_{f1}}{A_{w1}} = \frac{(300 \cdot 16)}{(392 - 16 \cdot 2) \cdot 11,5} = 1,159 > 1;$$

$$\Rightarrow \eta_1 = 1,4 - 0,02 \bar{\lambda}_1 = 1,4 - 0,02 \cdot 2,684 = 1,346;$$

$$m_{ef1} = \eta_1 m_1 = 1,346 \cdot 7,690 = 10,351.$$

При $\bar{\lambda}_1 = 2,684$ и $m_{ef1} = 10,351$ по табл. Д.3 СП 16.133330.2017 $\rightarrow \varphi_{e1} = 0,113$.

$$\frac{N_1}{\varphi_e A_1 R_y \gamma_c} = \frac{(119,73 \cdot 1\,000)}{0,113 \cdot 141,6 \cdot 3\,250 \cdot 1} < 1.$$

Условие устойчивости выполняется для обоих участков.

Расчет по деформационной модели сжато-изогнутой колонны ведется на основании решения методами строительной механики [3–6] (рис. 3). При решении задач строительной механики вводится упрощенная конструкция, освобожденная от факторов, несущественно влияющих на ее работу в целом.

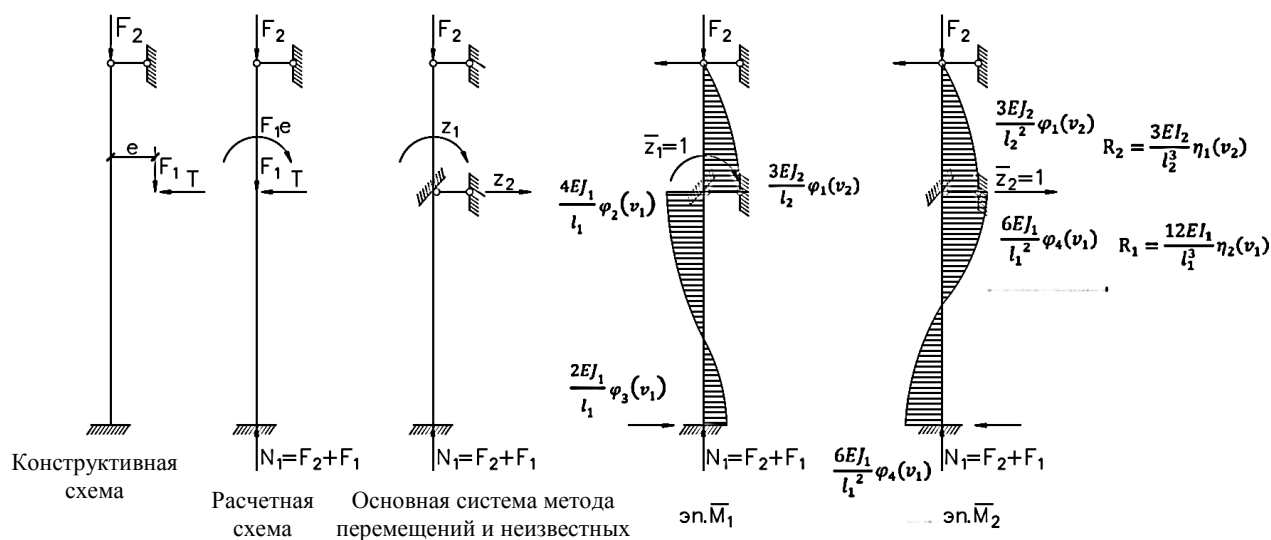


Рис. 3. Расчетные схемы и единичные эпюры сжато-изогнутой колонны (составлено авторами)

Вычислим расчетные длины и соответствующие параметры:

$$v_2 = \sqrt{\frac{F_2 l_2^2}{E I_2}} = 0,547; \quad (10)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{(F_1 + F_2) l_1^2}{E I_1}} = 1,128.$$

$$v_2 = \frac{l_2}{l_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \frac{F_2}{(F_1 + F_2)}} v_1 = \alpha_1 v_1 = 0,547. \quad (11)$$

$$\mu_1 = \frac{\pi}{v_1} = 2,785. \quad (12)$$

При этом μ_2 берется не более $\mu_2^{\max} = 3$. Принимаем $\mu_2 = 3$. С учетом вычисленных коэффициентов приведения μ_1 и μ_2 получим расчетные длины:

$$l_{1\text{расч}} = \mu_1 l_1 = 26,21 \text{ м}; \quad (13)$$

$$l_{2\text{расч}} = \mu_2 l_2 = 19,41 \text{ м}.$$

На основании принципа независимого действия сил окончательную эпюру моментов можно получить путем сложения в характерных сечениях ординат грузовой и исправленных единичных эпюр (рис. 4):

$$M_{\text{ок}} = \bar{M}_1 z_1 + \bar{M}_2 z_2 + M_p. \quad (14)$$

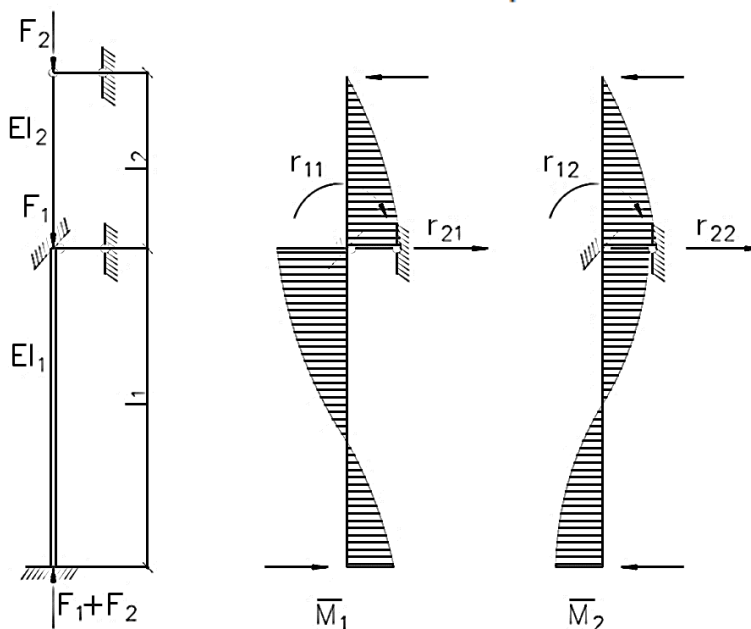


Рис. 4. Коэффициенты реактивных моментов, перемещений и единичные эпюры (составлено авторами)

Величины z_1 и z_2 находятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} r_{11} z_1 + r_{12} z_2 + R_{1p} = 0; \\ r_{21} z_1 + r_{22} z_2 + R_{2p} = 0. \end{cases} \quad (15)$$

При достижении нагрузки критического значения колонна теряет устойчивость и изгибается, что сопровождается линейными и угловыми смещениями ее узлов. Параметры устойчивости при этом становятся критическими.

Система уравнений содержит тригонометрические функции $\varphi_2(v_{11})$, $\varphi_4(v_{11})$, $\eta_2(v_{11})$, зависящие от параметра v сжатой колонны.

С учетом выражений (10)–(13) значения функций, входящих в систему уравнений для сжато-изогнутых стержней, будут следующими:

$$\varphi_1(v_2) = \frac{v_2^2 \operatorname{tg} v_2}{3(\operatorname{tg} v_2 - v_2)} = 0,980; \quad (16)$$

$$\eta_1(v_2) = \frac{v_2^3}{3(\operatorname{tg} v_2 - v_2)} = 0,880; \quad (17)$$

$$\varphi_2(v_1) = \frac{v_1(tg v_1 - v_1)}{8 tg v_1 (tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,957; \quad (18)$$

$$\varphi_3(v_1) = \frac{v_1(v_1 - \sin v_1)}{4 \sin v_1 (tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 1,022; \quad (19)$$

$$\varphi_4(v_1) = \frac{(\frac{v_1}{2})^2 tg \frac{v_1}{2}}{3(tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,979; \quad (20)$$

$$\eta_2(v_1) = \frac{(\frac{v_1}{2})^3}{3(tg \frac{v_1}{2} - \frac{v_1}{2})} = 0,873; \quad (21)$$

$$r_{11} = \frac{3EI_2}{l_2} \varphi_1(v_2) + \frac{4EI_1}{l_1} \varphi_2(v_1); \quad (22)$$

$$r_{11} = 2\,975 \varphi_1(v_2) + 3\,544 \varphi_2(v_1) = 6\,306,258 \text{ тм};$$

$$r_{12} = r_{21} = \frac{3EI_2}{l_2^2} \varphi_1(v_2) - \frac{6EI_1}{l_1^2} \varphi_4(v_1); \quad (23)$$

$$r_{12} = r_{21} = 460 \varphi_1(v_2) - 565 \varphi_4(v_1) = -102,163 \text{ тм};$$

$$r_{22} = \frac{3EI_2}{l_2^3} \eta_1(v_2) + \frac{12EI_1}{l_1^3} \eta_2(v_1); \quad (24)$$

$$r_{22} = 71,07 \eta_1(v_2) + 120 \eta_2(v_1) = 167,260 \text{ тм};$$

$$Det = r_{11} r_{22} - r_{12}^2 = 0; \quad (25)$$

$$R_{1p} = -F_1 e = -81,21 \text{ тм}; \quad (26)$$

$$R_{2p} = T = 1,52 \text{ т.}$$

С учетом найденных по формулам (16)–(26) величин получим из выражения (15) ординаты для единичных моментов:

$$z_1 = \frac{\begin{vmatrix} -R_{1p} & r_{21} \\ -R_{2p} & r_{22} \end{vmatrix}}{Det} = \frac{R_{2p} \cdot r_{21} - R_{1p} \cdot r_{22}}{Det}; \quad (27)$$

$$z_1 = \frac{1,52 \cdot (-102,163) - (-81,21) \cdot 167,260}{1\,044\,345,660} = 0,012\,9;$$

$$z_2 = \frac{\begin{vmatrix} r_{11} & -R_{1p} \\ r_{21} & -R_{2p} \end{vmatrix}}{Det} = \frac{R_{1p} \cdot r_{21} - R_{2p} \cdot r_{11}}{Det}; \quad (28)$$

$$z_2 = \frac{-81,21 \cdot (-102,163) - 1,52 \cdot 6\,306,258}{1\,044\,345,660} = -0,0012.$$

Эпюра изгибающих моментов (14) при найденных по выражениям (27) и (28) значениях z_1 и z_2 строится в основной системе метода перемещений, где имеется силовое воздействие. В данном случае внешние нагрузки действуют в сечениях, где введены связи, т.е. при $M_p = 0$ (рис. 5).

Проверяем поперечное сечение колонны по условию

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} \leq R_y \gamma_c,$$

или

$$\frac{N}{AR_y \gamma_c} + \frac{M}{W_x R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (29)$$

Для нижнего участка

$$\frac{N_1}{A_1 R_y \gamma_c} + \frac{M_1}{W_{x1} R_y \gamma_c} = \frac{119,73 \cdot 1\,000}{141,91 \cdot 3\,250 \cdot 1} + \frac{43,086 \cdot 100\,000}{2\,025,51 \cdot 3\,250 \cdot 1} = 0,260 + 0,655 = 0,914 < 1.$$

Для верхнего участка

$$\frac{N_2}{A_2 R_y \gamma_c} + \frac{M_2}{W_{x2} R_y \gamma_c} = \frac{45,9 \cdot 1\,000}{112,91 \cdot 3\,250 \cdot 1} + \frac{37,068 \cdot 100\,000}{1\,595,61 \cdot 3\,250 \cdot 1} = 0,125 + 0,715 = 0,840 < 1.$$

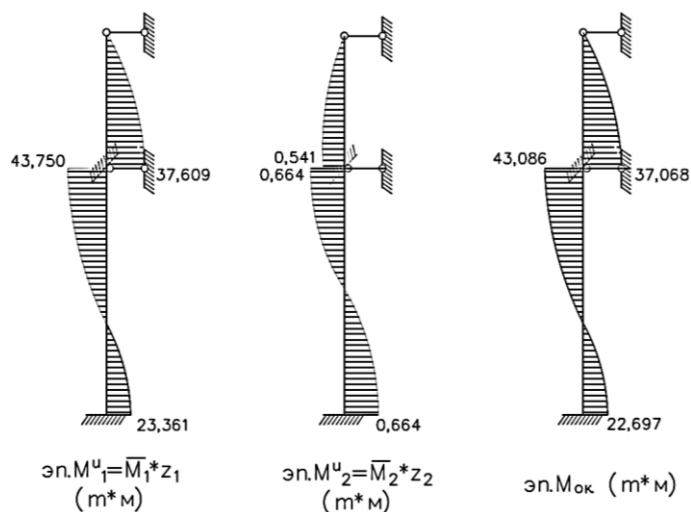


Рис. 5. Окончательная эпюра момента (составлено авторами)

Результаты проверок условия (29) получились весьма близкими к результатам, полученным из расчета по СП 16.133330.2017 «Стальные конструкции» и в ПВК SCAD Office.

На основе проведенного анализа можно сделать выводы. В целом влияние деформации на поведение сжато-изогнутых колонн является важным аспектом, который следует принимать во внимание при их проектировании. Исследования показывают, что использование расчета по деформированному состоянию способствует сокращению погрешности, которая может достигать 15–20 % при расчетах классическим методом. Это подчеркивает важность более тщательного анализа. Учет деформационных характеристик колонн (изгибных деформаций) позволяет лучше моделировать их поведение под нагрузкой. Включение данного расчета повысит верность прогнозов несущей способности колонн.

Для используемых материалов максимальное напряжение в колонне, согласно критерию прочности Мизеса, не превышает допустимого. Такая модель обеспечивает надежность опорной конструкции в эксплуатации, помогает избежать лишних затрат на материалы, делая проектирование более экономичным.

Основные факторы, влияющие на надежность сжато-изогнутых колонн, – это прочность материала, форма и условия их крепления, которые помогают колоннам справляться с нагрузками и сохранять свою целостность. Выбор оптимальных геометрических параметров снижает риск локальных разрушений, а материал с высокой прочностью обеспечивает большую устойчивость к изгибу, сжатию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 16.133330.2017. Свод правил. Стальные конструкции: актуализированная редакция СНиП II-23-81*: утвержден Минстроем России 27.02.2017 № 126/пр: // Меганорм. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293745/4293745484.pdf> (дата обращения: 30.06.2025).
2. Теплых А.В., Смирнов С.А., Горбушко М.А., Ерофеев И.М., Сидоров А.С. Инженерные технологии построения расчетных моделей и анализа результатов в системе SCAD Office: модели металлокаркасов. URL: https://www.cadmater.ru/magazin/articles/cm_35_scad_office.html (дата обращения: 30.06.2025).

3. Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. Динамика и устойчивость: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1972. 320 с.
4. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов. 3-е изд., испр. и доп. М.: Стройиздат, 1980. 616 с.
5. Металлические конструкции: учебник / Ю.И. Кудишин [и др.]. 13-е изд., испр. М.: Академия, 2011. 688 с.
6. Алексеев А.А., Ведерников В.Н. Строительная механика: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 116 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

ПРОНИНА Анастасия Владимировна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: pronina_anastasia_18@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Субботин С.Л., Баркая Т.Р., Пронина А.В. Оценка влияния деформируемости сжатой изогнутой колонны на ее устойчивость // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 3 (27). С. 17–25.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF DEFORMABILITY OF COMPRESSION-CURVED COLUMN ON ITS STABILITY

S.L. Subbotin, T.R. Barkaya, A.V. Pronina
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The paper compares the calculation of a compressed curved stepped column of an industrial building according to the methodology of SP 16.13330.2017 "Steel Structures" and according to the model that takes into account the deformation of the column by methods of stability theory in structural mechanics.

Keywords: industrial building column, stability, eccentricity, deformation calculation.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

BARAKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

PRONINA Anastasia Vladimirovna – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: pronina_anastasia_18@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Subbotin S.L., Barkaya T.R., Pronina A.V. Assessment of the influence of deformability of compression-curved column on its stability // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 3 (27), pp. 17–25.

УДК 624.139

К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

В.И. Трофимов

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Трофимов В.И., 2025

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная проблема повышения эффективности использования тяжелого бетона в транспортном и оборонном строительстве на Севере. Дана классификация областей применения тяжелого бетона с учетом его работы в сложных природно-климатических и грунтовых условиях строительства на Севере. Показано, что для повышения эффективности работы бетонных изделий и конструкций необходимо использовать модифицированные и дисперсно-армированные бетоны, а также многослойные бетонные изделия и конструкции с широким применением композитных материалов.

Ключевые слова: тяжелый бетон, физико-механические свойства, транспортное и оборонное строительство, армирование, модифицирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-3-25-35

Эффективное освоение уникальных, стратегически важных для нашей страны нефтяных месторождений, расположенных в удаленных районах Арктической зоны, и надежная их защита невозможны без применения новых строительных материалов, в частности бетонов нового поколения, и технологических решений на базе их использования.

Структурная схема основных разновидностей тяжелого бетона, широко применяемых в строительстве, представлена на рис. 1. Как видно, тяжелый бетон отличается хорошими физико-механическими свойствами и находит широкое применение в различных отраслях народного хозяйства.

Решение вопроса быстрее вовлечения арктических месторождений в народно-хозяйственную деятельность с учетом обеспечения их надежной защиты было отражено в специальной государственной программе, принятой Правительством РФ для реализации до 2030 года. При этом перспективы развития важнейшей нефтегазовой отрасли в Арктической зоне напрямую связаны с реализацией комплекса инфраструктурных проектов: строительством дорог и нефтепроводов, нефтяных и газовых резервуаров,