

УДК 624.072.2.014

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

EDN: FARWIB

ЭКОНОМИЯ СТАЛИ В КОЛОННЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

М.И. ФАРФЕЛЬ^{1,2,✉}, канд. техн. наукЕ.Д. МИХАЙЛИК^{1,2}

¹Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко
АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ),
Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Строительная наука всегда стремится к экономии материала, в том числе и при проектировании каркасов из стали. В настоящее время в современных строительных нормах расчет каркаса промышленного здания, а именно его колонн, ведется без учета жесткости подкрановой балки, воспринимающей нагрузку от мостового крана. Влияние этого фактора может дать определенную экономию металла, т. к. жесткость подкрановых конструкций напрямую влияет на устойчивость колонн промышленных зданий, а следовательно, и на металлоемкость каркаса.

Цель. Получение экономии стали при учете влияния жесткости подкрановой балки на устойчивость каркаса промышленного здания.

Материалы и методы. Для решения поставленной цели используются классические методы строительной механики. Для нахождения критических сил и коэффициентов расчетной длины при различных жесткостях элементов колонны использовался запрограммированный циклический алгоритм программного комплекса Mathcad.

Колонны промышленного здания обычно двухветвевые. Учитывая, что колонна двухветвевая, ее расчетная схема два раза статически неопределима по методу перемещений. Несущая способность колонны промышленного здания находится с помощью отыскания критической силы, которая определяется из уравнения, получаемого приравнением к нулю определителя устойчивости, состоящего из коэффициентов системы линейных уравнений метода перемещений. Помимо этого, определяется коэффициент расчетной длины для верхней и нижней частей колонны.

В статье произведено сравнение полученных результатов со схемой без учета подкрановой балки.

Результаты. Применение учета влияния жесткости подкрановой балки позволило уменьшить металлоемкость колонны на 30%. С помощью запрограммированного циклического алгоритма в программном комплексе Mathcad были найдены критические силы и коэффициенты расчетной длины при различных жесткостях элементов колонны.

Выводы. Наиболее полный учет жесткости конструкций элементов, входящих в каркас промышленных зданий, позволяет сократить расход металла.

Ключевые слова: промышленное здание, колонна, устойчивость, каркас, жесткость, податливость, металлоемкость, податливая опора, критическая сила, определитель устойчивости

Для цитирования: Фарфель М.И., Михайлик Е.Д. Экономия стали в колонне промышленного здания при учете влияния жесткости подкрановой балки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):71–83. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.04.2023

Поступила после рецензирования 28.04.2023

Принята к публикации 16.05.2023

STEEL SAVINGS IN AN INDUSTRIAL BUILDING COLUMN WITH ACCOUNT FOR EFFECT OF CRANE GIRDER STIFFNESS

M.I. FARFEL^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)
E.D. MIKHAILIK^{1,2}

¹ *Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation*

² *National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Construction science always seeks to save materials, including in the design of steel frameworks. Currently, in modern construction standards, structural analysis of frameworks for industrial buildings, namely their columns, is carried out without considering the stiffness of the crane girder which receives the load from the overhead crane. However, this factor can give a certain economy of metal, since the stiffness of crane structures directly affects the stability of columns of industrial buildings, and therefore the metal consumption of the framework.

Aim. To achieve savings of steel due to taking into account the effect of crane girder stiffness on the stability of an industrial building framework.

Materials and methods. For these purposes, the authors of the paper used classical methods of structural mechanics. A programmed cyclic algorithm of the Mathcad software was used to find the critical forces and effective length coefficients at various stiffnesses of the column elements. Columns of an industrial building are usually two-member. Given that, its structural design is twice statically indeterminate by the deflection method. The bearing capacity of an industrial building column is found by deriving the critical force, which is determined from the equation obtained by setting equal to zero the stability determinant consisting of the coefficients of the linear equation system by the deflection method. In addition, the effective length coefficient for the upper and lower parts of the column is determined. The paper compares the results obtained with the scheme without taking into account the crane girder.

Results. Considering the effect of the crane girder stiffness enabled the material consumption of the column to be reduced by 30 %. Critical forces and effective length coefficients were found at various stiffnesses of the column elements, using a programmed cyclic algorithm of the Mathcad software.

Conclusion. Taking into account the stiffness in the structures of the elements in the industrial building frameworks reduces metal consumption.

Keywords: industrial building, column, stability, framework, stiffness, yielding, metal consumption, yielding support, critical force, stability determinant

For citation: Farfel M.I., Mikhailik E.D. Steel savings in an industrial building column with account for effect of crane girder stiffness. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):71–83. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

Author contribution statements

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.04.2023

Revised 28.04.2023

Accepted 16.05.2023

Введение

Одной из ключевых задач строительной науки является получение экономии материала при проектировании стального каркаса. В настоящей работе показано, как учет жесткости подкрановых балочных конструкций промышленного здания позволяет получить экономию материала при проектировании колонн промышленного здания.

На устойчивость колонны в горизонтальной плоскости влияет жесткость подкрановой балки, включающей в себя непосредственно саму балку и тормозную конструкцию.

Рассмотрим случай, когда подкрановая конструкция в вертикальной плоскости представляет собой шарнирно опертую на колонну разрезную балку, а в горизонтальной – неразрезную (неразрезность конструкции обеспечивает тормозной лист подкрановой конструкции).

Цель работы: получение экономии стали при учете влияния жесткости подкрановой балки на устойчивость каркаса промышленного здания.

Задачи исследования:

- построение расчетной схемы колонны промышленного здания с введением в нее «пружинной» опоры и без нее;
- определение жесткости неразрезной подкрановой балки в горизонтальной плоскости;
- определение жесткости упругоподатливой опоры, моделирующей влияние подкрановой балки на колонну;
- построение блок-схемы для определения критических сил и коэффициентов приведенной длины;
- расчет коэффициента приведенной длины для нижней и верхней частей колонны при разных отношениях критической силы, отношениях моментов инерции и отношениях площадей сечений;
- определение критических сил и коэффициентов приведенной длины без учета влияния подкрановой балки;

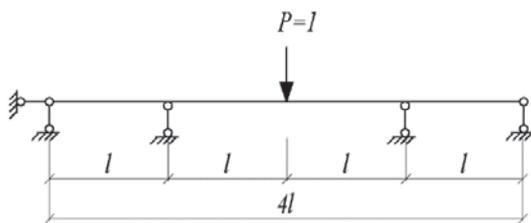


Рис. 1. Расчетная схема подкрановой балки без учета ее жесткости

Fig. 1. Crane girder structural design without considering its stiffness

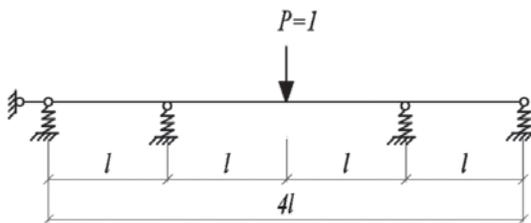


Рис. 2. Расчетная схема подкрановой балки для определения жесткости упругоподатливой опоры

Fig. 2. Crane girder structural design for determining stiffness of yielding support

– построение графиков зависимости коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил, моментов инерции и площадей сечений;

– сравнение результатов определения критических сил и коэффициентов приведенной расчетной длины при учете воздействия подкрановой балки и без ее воздействия на колонну;

– анализ полученных результатов и определение экономии стали при проектировании колонн с учетом воздействия подкрановых конструкций на них.

Для реализации поставленной цели предварительно найдем жесткость упругоподатливой опоры, моделирующей жесткость подкрановой балки методом сил.

Расчетная схема подкрановой неразрезной четырехпролетной балки без упругоподатливой опоры и с ее учетом представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Определение жесткости подкрановой балки (рис. 2) сводится к нахождению податливости элементов системы.

На данную четырехпролетную подкрановую балку наложено 5 связей (4 опоры, дающие реакцию в вертикальном направлении, и одна по горизонтали). Система дважды статически неопределима, поэтому для нахождения неизвестных недостаточно одних лишь уравнений статики. Поскольку система симметрична относительно точки приложения силы. Рассматривая систему с этой позиции, разрежем балку по центральному сечению и отбросим правую часть. Возникают три силовых фактора: продольная сила реакции N , вертикальная сила реакции Q и момент R . В силу симметричности системы и симметрии приложения нагрузки кососимметричный фактор Q равняется нулю; N также равняется нулю из уравнения статики. Таким образом, если рассматривать систему, разрезав ее пополам, получается система один раз статически неопределима (рис. 3). Для раскрытия этой неопределимости используем метод сил, чтобы найти все неизвестные реакции.

Неизвестный силовой фактор R найдем из канонического уравнения метода сил [1]. Прикладываем единичный момент, где приложен момент R , строим соответствующую эпюру, находим реакции в пружинах (рис. 4):

Эпюра от заданной силы $P/2$ представлена на рис. 5.

Записываем каноническое уравнение метода сил и по правилу Верещагина определяем коэффициенты δ_{11} и δ_{1P} :

$$\delta_{1F} + R \times \delta_{11} = 0;$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \times \left[1 \times l \times 1 + \frac{J \times 1}{2} \times \frac{2}{3} \right] + c \left[\left(\frac{1}{l} \right)^2 + \left(\frac{1}{l} \right)^2 \right] = \frac{4}{3} \times \frac{l}{EJ} + c \times \frac{2}{l^2};$$

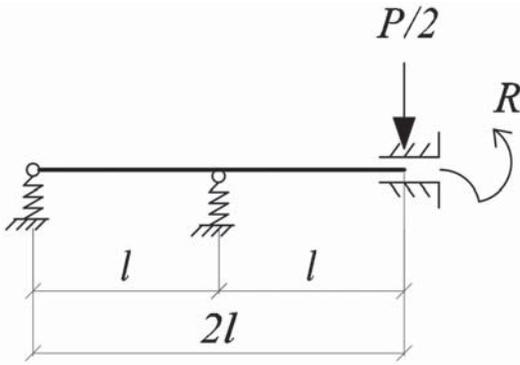


Рис. 3. К расчету подкрановой балки методом сил
Fig. 3. Calculation of crane girder by force method

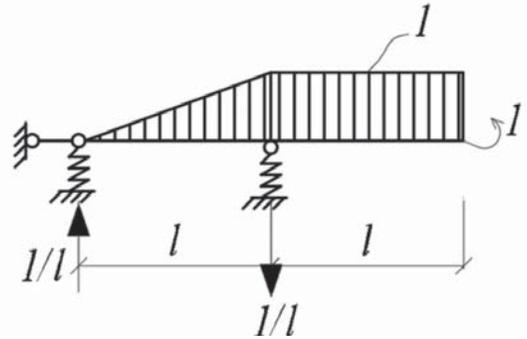


Рис. 4. Эпюра от единичного момента
Fig. 4. Unit moment diagram

$$\delta_{1P} = -\frac{1}{EJ} \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{Pl}{2} \times l \times 1 + \frac{1}{2} \times \frac{Pl}{2} \times l \times \frac{2}{3} \right] - c \left[\frac{P}{2} \times \frac{1}{l} + P \times \frac{1}{l} \right] = -\frac{5}{12} \times \frac{Pl^2}{EJ} - c \times \frac{3}{2} \times \frac{P}{l},$$

где l – длина подкрановой балки;

EJ – жесткость балки;

c – коэффициент податливости упругой опоры.

Неизвестный силовой фактор R равняется:

$$R = -\frac{\delta_{1P}}{\delta_{11}} = \frac{\frac{5}{12} \times \frac{l^2}{EJ} + \frac{3}{2} \times c \times \frac{1}{l}}{\frac{4}{3} \times \frac{l}{EJ} + c \times \frac{2}{l^2}} \times P.$$

Перемещение в центральной точке равняется $P \times c$ (осадка упругих опор). Приложим силу в центре, то есть $\frac{1}{2} P$ к отброшенной части симметричной заданной системы. Эпюра от единичной силы $\frac{1}{2} P$ представлена на рис. 6.

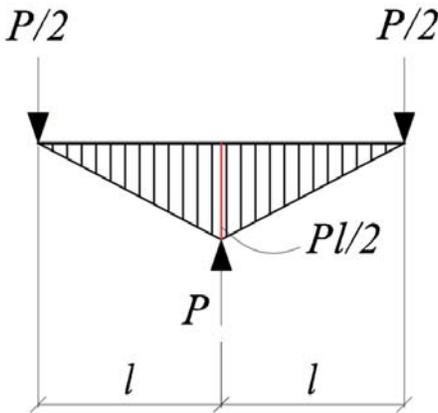


Рис. 5. Эпюра от заданной силы $P/2$
Fig. 5. Diagram due to given force $P/2$

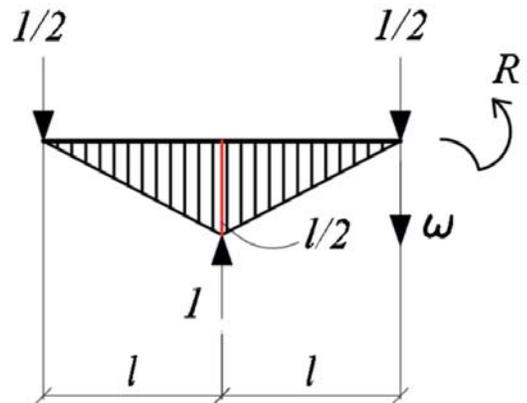


Рис. 6. Эпюра от единичной силы $P/2$
Fig. 6. Diagram due to unit force $P/2$

Далее решаем интеграл Мора графически по правилу Верещагина:

$$\omega = \delta_{22} \times P + \delta_{21} \times R$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EJ} \times \left[2 \times \frac{1}{2} \times l \times \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times \frac{l}{2} \right] + c \times \left[\left(\frac{l}{2} \right)^2 + (l)^2 \right] = \frac{l^3}{6EJ} + \frac{5}{4} c$$

$$\delta_{21} = \frac{1}{F} \delta_{1P}$$

$$\omega = \delta_{22} \times P + \delta_{21} \times R = \frac{7 \times P \times l^6 + c \times 108 \times EJ \times P \times l^3 + 36 \times EJ^2 \times P \times c^2}{192 \times EJ \times l^3 + 288 \times EJ^2 \times c} = P \times c.$$

После преобразований получим уравнение:

$$7 \times l^6 - (252 \times EJ^2 \times c^2 + 84 \times EJ \times l^3 \times c).$$

Найдем c по формуле для корней и отбросим корень с отрицательной частью. В результате податливость C подкрановой балки равняется:

$$C = \frac{\sqrt{2}-1}{6} \times \frac{l^3}{E \times J_H}$$

Жесткость, j – обратная величина податливости:

$$j = \frac{1}{C}.$$

Решение задачи об определении критических сил методом перемещений сводится к отысканию минимального корня уравнения устойчивости, получаемого приравнением к нулю определителя. Составим расчетную схему колонны с учетом жесткости подкрановой балки промздания и построим эпюры методом перемещений [1] (рис. 7).

Запишем систему канонических уравнений метода перемещений с учетом упругоподатливой опоры, используя критические табличные параметры $\varphi_i(v)$ и $\eta_i(v)$ [1], и найдем значения коэффициентов, входящих в определитель устойчивости D .

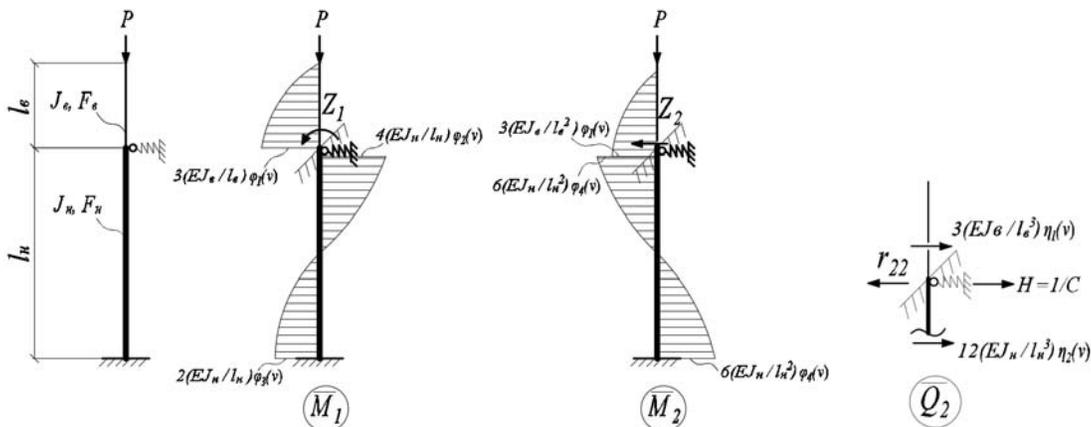


Рис. 7. Расчетная схема колонны
 Fig. 7. Column structural design

$$\begin{aligned}
 r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + R_{1p} &= 0 \\
 r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + R_{2p} &= 0 \\
 r_{11} &= 3(EJ_B/L_B) \times \varphi_1(v) + 4(EJ_H/L_H) \times \varphi_2(v) \\
 r_{12} &= 6(EJ_H/L_H^2) \times \varphi_4(v) - 3(EJ_B/L_B^2) \times \varphi_1(v) \\
 r_{22} &= 3(EJ_B/L_B^3) \times \eta_1(v) + 12(EJ_H/L_H^3) \times \eta_2(v) + \frac{1}{C} \\
 D &= \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix} = 0 \\
 r_{11} \times r_{22} - r_{12}^2 &= 0
 \end{aligned}$$

Без учета жесткости подкрановой балки также составим канонические уравнения метода перемещений и определитель устойчивости D_1 с использованием критических параметров:

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= 3(EJ_B/L_B) \times \varphi_1(v) + 4(EJ_H/L_H) \times \varphi_2(v) \\
 r_{12} &= 6(EJ_H/L_H^2) \times \varphi_4(v) - 3(EJ_B/L_B^2) \times \varphi_1(v) \\
 r_{22C} &= 3(EJ_B/L_B^3) \times \eta_1(v) + 12(EJ_H/L_H^3) \times \eta_2(v) \\
 D_1 &= \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22C} \end{vmatrix} = 0 \\
 r_{11} \times r_{22C} - r_{12}^2 &= 0
 \end{aligned}$$

После решения определителей устойчивости D и D_1 и нахождения критических сил по критическому параметру был использован запрограммированный циклический алгоритм в программном комплексе Mathcad.

Для решения сложного нелинейного уравнения устойчивости при раскрытии определителя D в программном комплексе Mathcad находились корни с помощью метода деления отрезка пополам (метод бисекции) – один из простейших методов нахождения корней нелинейных уравнений. Блок-схема итерационного метода представлена на рис. 8.

Для реализации дальнейших расчетов была составлена блок-схема, используемая в качестве алгоритма в программном комплексе Mathcad (рис. 9).

В результате были получены графики зависимостей коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил, моментов инерции и площадей сечения (рис. 10–12).

Проведя анализ результатов по приведенным графикам и выполнив сравнение с традиционным методом расчета, при котором не учитывается жесткость подкрановой балки, было получено: увеличение критической силы F на 20%, уменьшение момента инерции на 20% и уменьшение площади сечения на 30%.

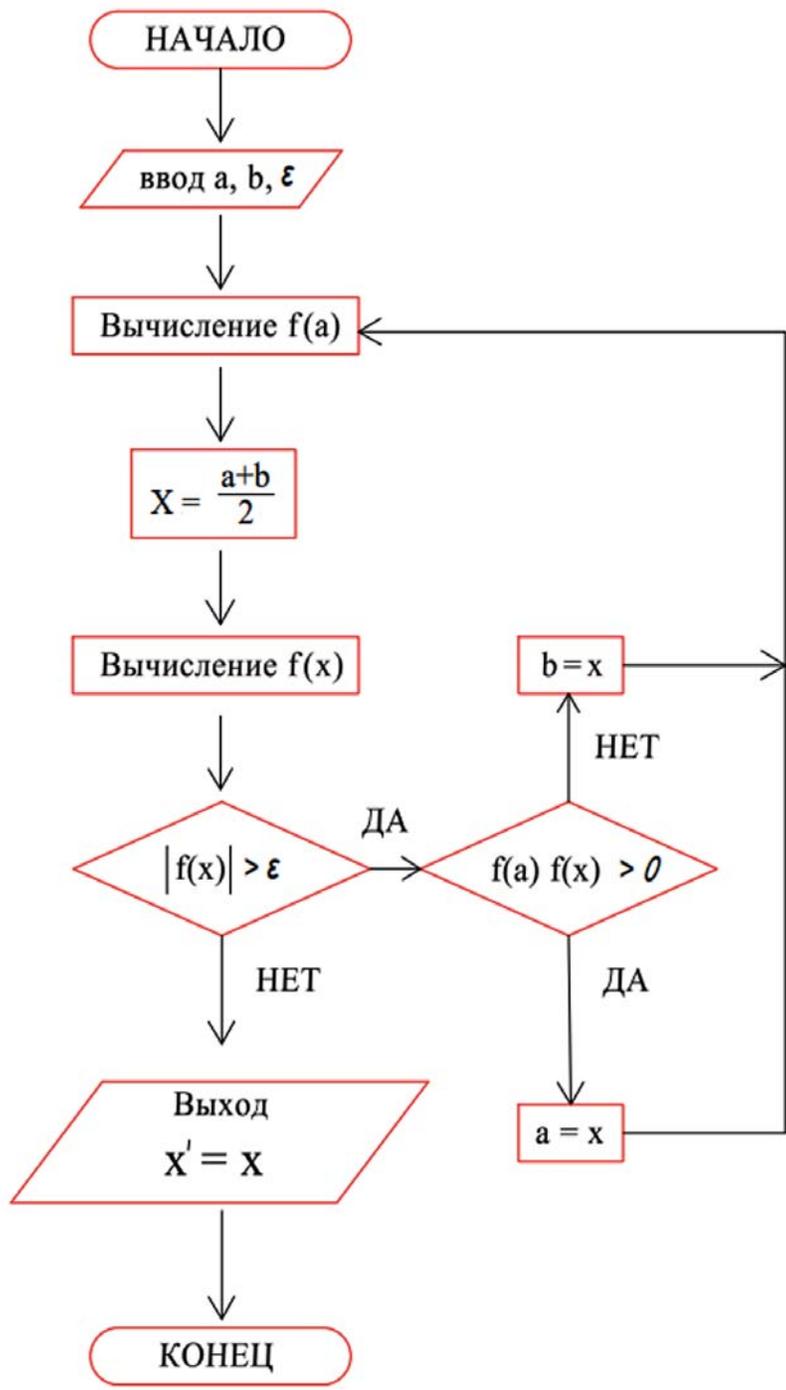


Рис. 8. Блок-схема итерационного метода
a и *b* – концы интервала – величины *v*; *f(x)* – правая часть уравнения;
ε – точность вычислений; *x'* – корень решения нелинейного уравнения
Fig. 8. Schematic diagram of iteration method
a and *b* – the values of the interval extremities *v*; *f(x)* – the right part of the equation;
ε – calculation accuracy; *x'* – the root of the nonlinear equation solution

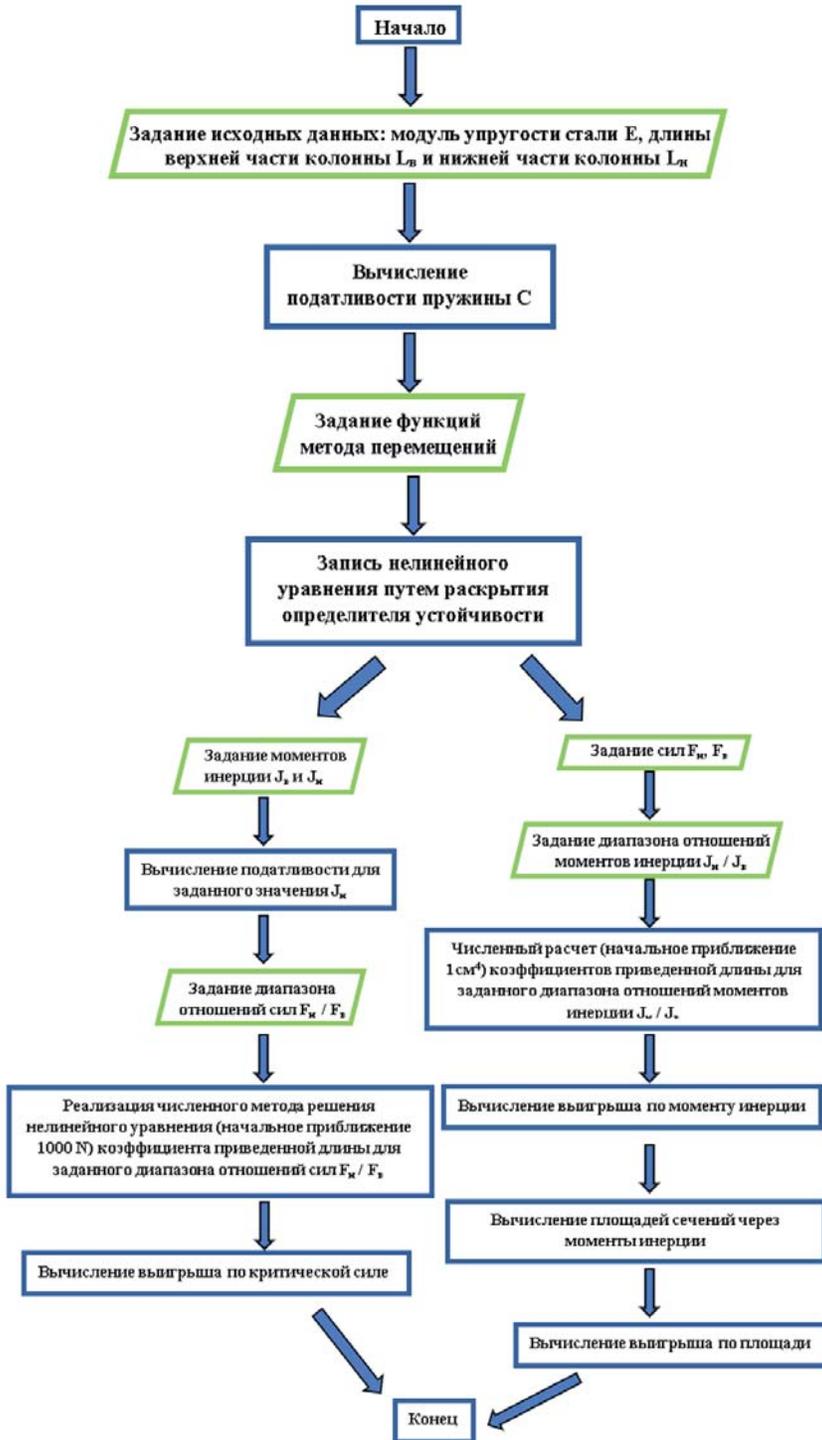


Рис. 9. Блок-схема
Fig. 9. Schematic diagram

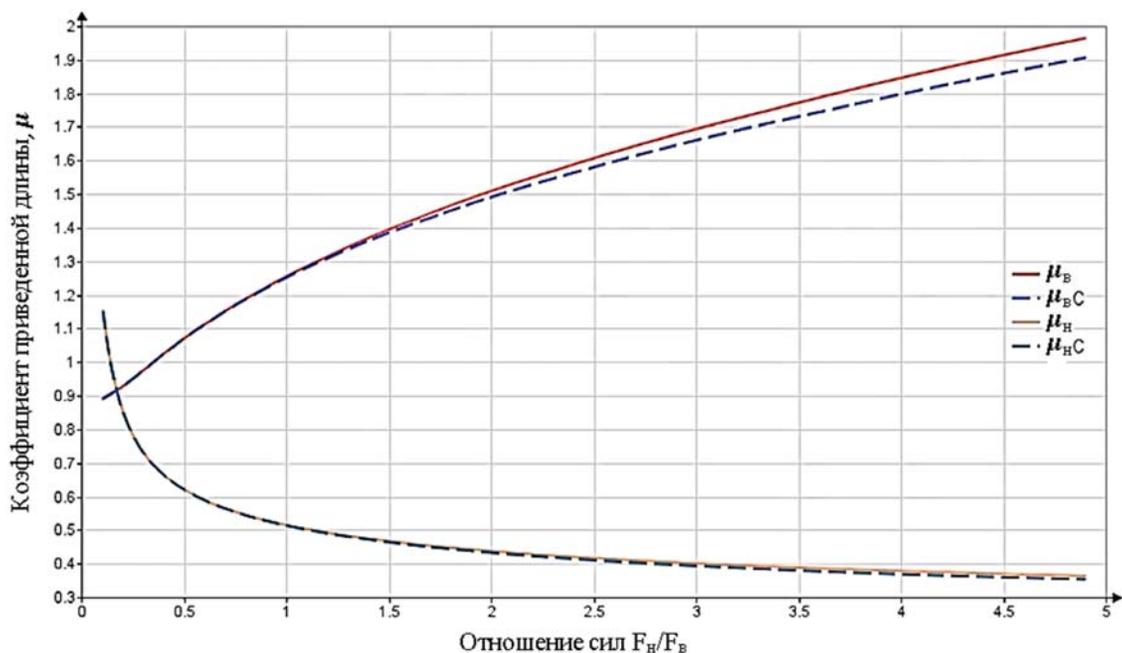


Рис. 10. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил
 Fig. 10. Dependence of effective length coefficients on critical forces ratio

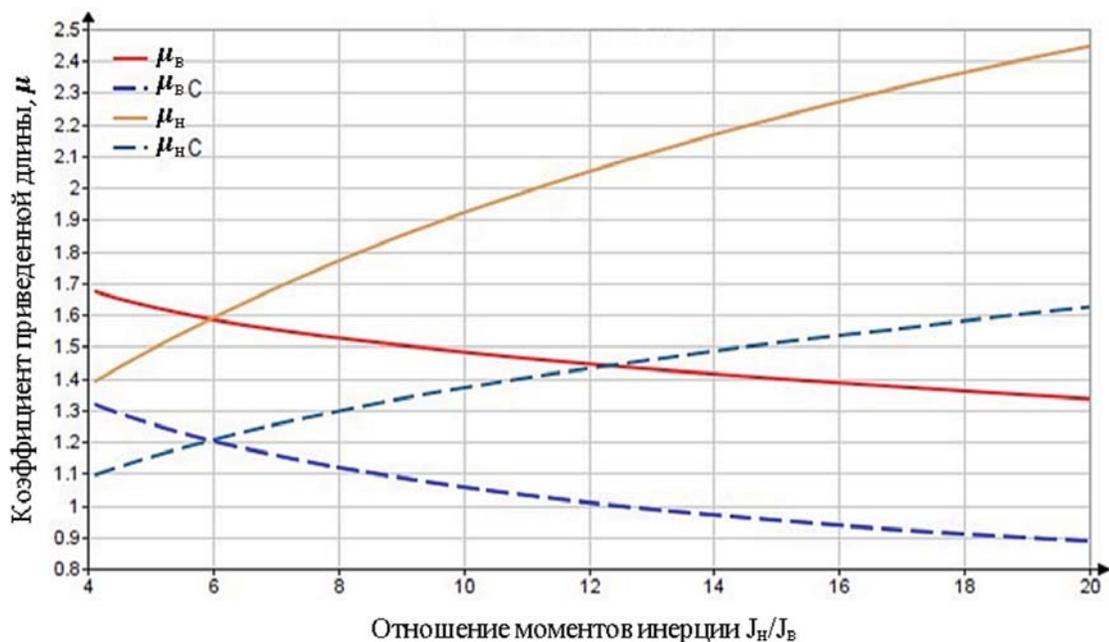


Рис. 11. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения моментов инерции
 Fig. 11. Dependence of effective length coefficients on inertia ratio

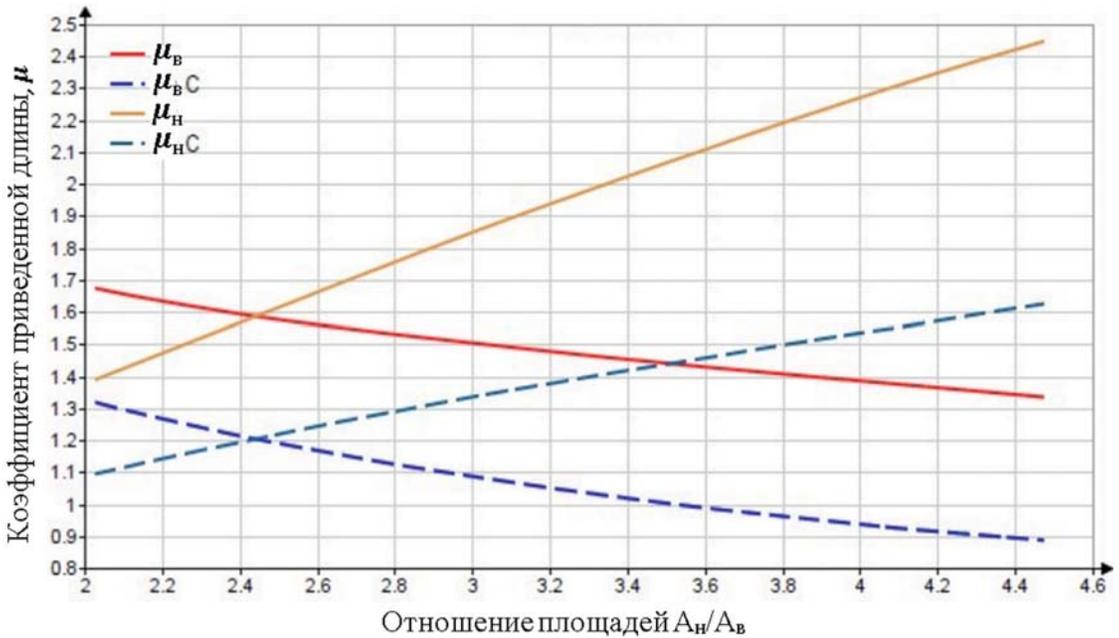


Рис. 12. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения площадей сечений

Fig. 12. Dependence of effective length coefficients on cross-sectional area ratio

Выводы

1. Критическая сила (см. рис. 10) при введении упругоподатливой опоры становится больше на 20 %.
2. При учете работы подкрановой балки в каркасе здания момент инерции уменьшился на 20 % (см. рис. 11), так как коэффициент приведенной длины прямо пропорционален площади и обратно пропорционален критической силе.
3. Площадь сечения при прочих фиксированных величинах уменьшается на 30 % (см. рис. 12).

Список литературы

1. Дарков А.В., Клейн, Г.К., Кузнецов, В.И., Лужин О.В., Рекач В.Г., Синельников В.В., Шпиро Г.С. (под ред. Даркова А.В.). Строительная механика. Москва: Высшая школа; 1976.
2. Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. Издание второе переработанное и дополненное. Москва: Высшая школа; 1972.
3. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. (ред.), [и др.]. Металлические конструкции. Изд. 12-е. Москва: Академия; 2010.
4. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4 и № 5). Москва: Минстрой России; 2017.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4). Москва: Стандартинформ; 2018.
6. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования (с Изменениями № 1, № 2 и № 3). Москва: Минстрой России; 2017.

7. *Безухов Н.И., Лужин О.В., Колкунов Н.В.* Устойчивость и динамика сооружений (в примерах и задачах). Изд. 3-е. Москва: Высшая школа; 1987.
8. *Вольмир А.С.* Устойчивость деформируемых систем. Изд. 2-е. Москва: Наука; 1967.
9. *Дьяконов В.П.* Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. Универсальная система математических расчетов. Москва: СК Пресс; 1998.
10. *Киселев В.А.* Строительная механика. Специальный курс. Динамика и устойчивость сооружений. Москва: Стройиздат; 1980.

References

1. *Darkov A.V., Klein, G.K., Kuznetsov, V.I., Luzhin O.V., Rekach V.G., Sinelnikov V.V., Shpiro G.S.* Construction mechanics. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1976. (In Russian).
2. *Klein G.K., Rekach V.G., Rosenblat G.I.* Guide to practical classes in the course of structural mechanics. The second edition has been revised and supplemented. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1972. (In Russian).
3. *Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignat'eva V.S.* Metal structures. 12th Ed. Moscow: Akademiya Publ.; 2010. (In Russian).
4. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNIIP II-23-81* (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4 and No. 5). Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
5. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNIIP 2.01.07-85* (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4). Moscow: Standartinform; 2018. (In Russian).
6. SP 294.1325800.2017. The construction of steel. Design rules (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3). Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
7. *Bezukhov N.I., Luzhin O.V., Kolkunov N.V.* Stability and dynamics of structures (in examples and tasks). 3rd Ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1987. (In Russian).
8. *Volmir A.S.* Stability of deformable systems. 2nd Ed. Moscow: Nauka Publ.; 1967. (In Russian).
9. *Dyakonov V.P.* Handbook of MathCAD PLUS 7.0 PRO. Universal system of mathematical calculations. Moscow: SK Press; 1998. (In Russian).
10. *Kiselev V.A.* Construction mechanics. A special course. Dynamics and stability of structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1980. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Иосифович Фарфель[✉], канд. техн. наук, заведующий лабораторией нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: farfelmi@yandex.ru
тел.: +7 (499) 170-10-87

Mikhail I. Farfel[✉], Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Laboratory for Reconstruction, Standardization, and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Department of Metal Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: farfelmi@yandex.ru
tel.: +7 (499) 170-10-87

Екатерина Дмитриевна Михайлик, инженер лаборатории нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», магистр кафедры металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: mihailik1999@list.ru
тел.: +7 (923) 128-24-28

Ekaterina D. Mikhailik, Engineer, Laboratory for Reconstruction, Standardization, and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Master (Engineering), Department of Metal and Wooden Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: mikhailik1999@list.ru
tel.: +7 (923) 128-24-28

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author