

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ANALYSIS AND DESIGN OF BUILDING STRUCTURES

DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-2-93-103
УДК 69.059.4


НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Нелинейный и линейный анализ общей устойчивости несущей системы высотного здания ствольного типа

О.В. Иноземцева¹  , В.К. Иноземцев² 

¹КБ «СмартПроект», Москва, Российская Федерация

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Российская Федерация

 olga.inozemtseva@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 21 января 2022 г.
Доработана: 22 марта 2022 г.
Принята к публикации: 30 марта 2022 г.

Аннотация. В проектной практике проектировщики стремятся создавать как можно более сложные и детализированные расчетные модели, которые реализуются численно с помощью расчетных компьютерных программ. Численные результаты расчета можно и необходимо тестировать, но что более проблематично – это тестирование сложной и детализированной расчетной модели. Такую возможность дают упрощенные модели, представленные простыми расчетными схемами, которые доступны для качественного анализа, а получаемые численные результаты предсказуемы. Такие расчетные схемы, как правило, описывают отдельные расчетные проблемы, стоящие перед проектировщиками. Так, например, возможен линейный анализ устойчивости каркаса высотного здания на основе простых расчетных процедур, предлагаемых Американским институтом стальных конструкций (AISC). Рассматривается одна из таких моделей, позволяющая предварительно оценить ожидаемое значение критической нагрузки и протестировать сложную расчетную модель, а также получаемые на ее основе результаты расчетов. Данная модель основана на линейном анализе устойчивости консольной стойки, которую можно рассматривать как простую модель несущего ствола высотного здания. Получены результаты расчетов и проведено сравнение критических нагрузок на основе нелинейного и линейного анализа устойчивости консольной стойки при различной по высоте стойки изгибной жесткости и интенсивности распределенной по высоте вертикальной нагрузки. Сделан вывод, что рассмотренная линейная модель позволяет получить предварительную оценку критической нагрузки для тестирования результатов компьютерного расчета по более сложным моделям общей устойчивости равновесия несущего ствола высотного объекта.

Ключевые слова: высотный объект, общая устойчивость, тестирование результатов, нелинейная модель устойчивости, линейная модель устойчивости, критическая нагрузка

Для цитирования

Иноземцева О.В., Иноземцев В.К. Нелинейный и линейный анализ общей устойчивости несущей системы высотного здания ствольного типа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 93–103. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-93-103>

Иноземцева Ольга Вячеславовна, кандидат технических наук, ведущий конструктор, КБ «СмартПроект», Российская Федерация, 105082, Москва, ул. Большая Почтовая, д. 26В, стр. 2; ORCID: 0000-0002-6608-7458, eLIBRARY SPIN-код: 2222-4326; olga.inozemtseva@yandex.ru

Иноземцев Вячеслав Константинович, доктор технических наук, профессор, кафедра «Строительные материалы, конструкции и технологии», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77; ORCID: 0000-0003-2817-0426, eLIBRARY SPIN-код: 8384-7039; aditi2003@mail.ru

© Иноземцева О.В., Иноземцев В.К., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Nonlinear and linear analysis of the overall stability of the load-bearing system of a high-rise building with a load-bearing trunk

Olga V. Inozemtseva¹✉, Vyacheslav K. Inozemtsev²

¹Construction Bureau “SmartProekt,” Moscow, Russian Federation

²Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, Saratov, Russian Federation

✉ olga.inozemtseva@yandex.ru

Article history

Received: January 21, 2022

Revised: March 22, 2022

Accepted: March 30, 2022

For citation

Inozemtseva O.V., Inozemtsev V.K. Nonlinear and linear analysis of the overall stability of the load-bearing system of a high-rise building with a load-bearing trunk. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):93–103. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-93-103>

Abstract. The results of numerical calculations can and should be verified, but testing a complex and detailed computational model is problematic. This possibility is provided by simplified models represented by simple computational schemes that are available for qualitative analysis, and the numerical results obtained are predictable. Such calculation schemes, as a rule, describe individual calculation tasks facing designers. For example, linear stability analysis is offered by the American Institute of Steel Structures (AISC). One of these models is discussed. The model under consideration is based on a linear analysis of the stability of a cantilever rack, which can be considered as a simple model of the bearing trunk of a high-rise building. A comparison of critical loads based on nonlinear and linear analysis of the stability of the cantilever rack is carried out. It is concluded that the considered linear model makes it possible to obtain a preliminary estimate of the critical load to verify the results of computer calculations using more complex models of the general stability of the equilibrium of the bearing trunk of a high-altitude object.

Keywords: high-altitude object, general stability, testing of results, nonlinear stability model, linear stability model, critical load

Введение

Одной из проблем проектирования сложных уникальных объектов является создание их расчетной схемы. При этом имеет место стремление проектировщиков создавать как можно более сложные и детализированные расчетные схемы. Однако увеличение сложности и детализации расчетной схемы не увеличивает автоматически уверенность в правильности результатов ее численного анализа. Численная реализация расчетной схемы осуществляется с использованием компьютерных программ расчета. При этом может быть применен «двойной расчет», позволяющий получить численные результаты по двум компьютерным расчетным программам. Сопоставление двух результатов расчета, полученных по различным расчетным программам, позволяет обеспечить уверенность в правильной реализации расчетной схемы в программных комплексах, а не в достаточной адекватности расчетной схемы проектируемому высотному объекту. Таким образом, наряду с численным анализом сложных и детализированных расчетных схем необходимо получить результаты расчета, представленные простыми расчетными схемами, которые доступны для качественного анализа, а получаемые численные результаты предсказуемы. Такие расчетные схемы, как правило, описывают отдельные расчетные проблемы, стоящие перед проектировщиками. Для задачи общей устойчивости несущего ствола высотного здания часто используется модель консольной стойки [1–5]. Любая задача устойчивости, как известно, является нелинейной. Задача общей устойчивости стойки тоже решается с использованием нелинейного анализа устойчивости. Например, классический метод Релея – Ритца, применяемый для решения задач устойчивости, дает достаточно точное приближенное решение. К более точному результату приводит известная формула Тимошенко [6; 7].

Примером задач, решаемых проектировщиками, является устойчивость вертикального положения высотного объекта на деформируемом основании со сложными нелинейными свойствами, которые рассмотрены в [8–10]. Задача устойчивости высотного объекта против опрокидывания рассматривает грунтовые основания с односторонними связями (конструктивной нелинейностью). Заложили основу аналитической

Olga V. Inozemtseva, Candidate of Technical Sciences, leading designer, Construction Bureau “SmartProekt,” 26B Bolshaya Pochtovaya St, bldg 2, Moscow, 105082, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-6608-7458, eLIBRARY SPIN-code: 2222-4326; olga.inozemtseva@yandex.ru

Vyacheslav K. Inozemtsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Building Materials, Structures and Technologies, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, 77 Politekhnicheskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2817-0426, eLIBRARY SPIN-code: 8384-7039; aditi2003@mail.ru

статики для таких систем авторы [11–13]. Согласно СП 63.13330.2012¹, при решении таких задач, получивших в проектной практике название «устойчивости положений», рекомендуется использовать простую расчетную схему, в которой конструктивная часть высотного здания принимается как жесткое недеформируемое тело. Нелинейность, связанная с проблемой устойчивости в этих задачах, называется статической нелинейностью. В задаче общей устойчивости несущей системы высотного здания ствольного типа нелинейную расчетную схему можно заменить расчетной схемой для линейного анализа устойчивости. На возможность линейного анализа устойчивости консольной стойки на основе простых расчетных процедур указывал Американский институт стальных конструкций (AISC)². Две такие расчетные процедуры описываются в [14]. В основе линейного анализа лежит допущение, которое позволяет заменить форму потери устойчивости консольной стойки формой изгиба стойки при нагружении поперечной нагрузкой. Для подобной замены необходимо предположить, что различие между формой выпучивания при потере устойчивости стойки и формой изгиба стойки при действии поперечной нагрузки не приведет к значительной погрешности при определении критической нагрузки. Вопросу проверки устойчивости конструкций расчетом по недеформируемой схеме уделено значительное внимание в Еврокоде 2 и Еврокоде 3³.

В статье дается численная оценка такой погрешности. Простая расчетная схема линейного анализа общей устойчивости здания ствольного типа позволит предварительно оценить величину критической нагрузки и при необходимости произвести корректировку сложной и детализированной расчетной схемы в соответствии с результатами линейного анализа устойчивости.

Методы и материалы

Простейшая расчетная схема для рассматриваемых задач устойчивости – консольная стойка, заземленная в опорном узле и нагруженная собственным весом (рис. 1).

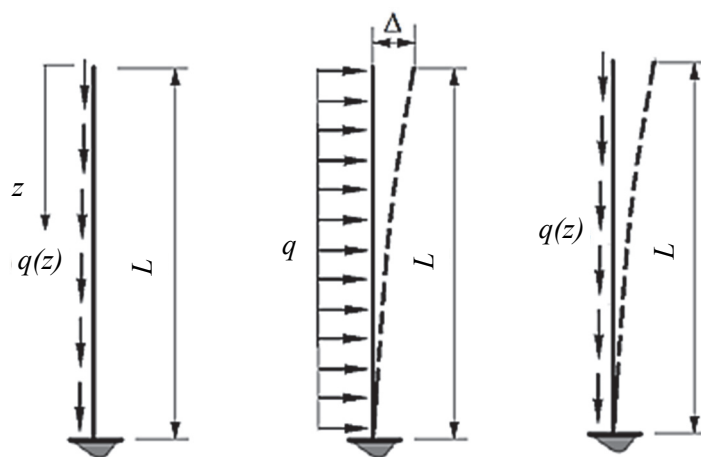


Рис. 1. Изгиб и форма потери устойчивости консольного стержня
Figure 1. Bending and the form of loss of stability of the cantilever rod

Задача устойчивости такой стойки описывается каноническим уравнением Бесселя, где искомой функцией является не поперечное перемещение, а угол поворота θ .

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{1}{t} \frac{d\theta}{dt} + \left[1 - \left(\frac{1}{3} \right)^2 \frac{1}{t^2} \right] \theta = 0. \quad (1)$$

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. М., 2013.

² AISC–88. Specification for structural steel buildings. Chicago: American Institute of Steel Construction, 1988; AISC-2005. Specification for structural steel building, ANSI/AISC 360–05. Chicago: American Institute of steel Construction, 2005. 519 p.

³ EN 1992-1-1. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1–1. General – common rules for buildings and civil engineering structures. Brussels: CEN, 2005; EN 1993-1-6. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–6. Strength and stability of shell structures. Brussels: CEN, 2007.

Решение этого уравнения для граничных условий $\theta' = 0$ при $z = 0$ и $\theta = 0$ при $z = L$ имеет вид

$$(qH)_{kp} = 7,837EJ/L^2. \quad (2)$$

Таким образом, устойчивость несущей системы в виде ядра жесткости высотного здания рассматривается с позиций устойчивости Эйлера как консольный стержень, заземленный в основании.

При линейном анализе устойчивости используется расчетная схема в виде стойки нагруженной поперечной нагрузкой (рис. 1). Величина горизонтального перемещения вершины стойки ($\Delta = qL^4/(8EJ)$), используется при оценке величины критической нагрузки

$$P_{kp} = kqL^2/\Delta. \quad (3)$$

Ожидаемая погрешность этого значения критической нагрузки по сравнению с точным решением на основе уравнения Бесселя должна допускать возможность предварительной оценки величины критической нагрузки и сравнения ее с численными результатами реализации сложных, детализированных расчетных схем с использованием компьютерных программ расчета.

Результаты и обсуждение

В качестве модельного примера рассматривается устойчивость колонны консольного типа под действием собственного веса:

- высота колонны $L = 20$ м;
- нагрузка $q = 77,3125$ кН/м (рис. 1);
- момент инерции поперечного сечения (рис. 2) $J = 2,718$ м⁴;
- изгибная жесткость поперечного сечения $EJ = 107\,361,9$ кНм².

Решение этой задачи устойчивости хорошо известно как решение канонического уравнения Бесселя для критической нагрузки P_{kp} :

$$(qL)_{kp} = 7,837EJ/L^2. \quad (4)$$

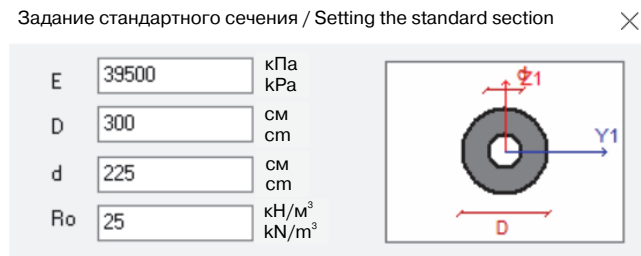


Рис. 2. Стандартное поперечное сечение консольной стойки
Figure 2. Standard cross-section of the console rack

Таким образом, величина критической нагрузки колонны будет

$$P_{kp} = 7,837 \times 107\,361,9/400 = 2103,48 \text{ кН}. \quad (5)$$

Используем программный комплекс «Лира-САПР» при компьютерном расчете этой же задачи для определения конечно-элементного деления области интегрирования. Точность оценки критической нагрузки при высоте колонны 20 м достигается при уменьшении шагов разбиения h (табл. 1).

Как показывают расчеты (столбец 5, табл. 1) величина критической нагрузки с уменьшением шага разбиения h быстро сходится (рис. 3, а), погрешность численного расчета (столбец 6, табл. 1) по сравнению с аналитическим решением (2) быстро убывает (рис. 3, б).

Сопоставим полученные результаты расчета с линейным анализом устойчивости, рассматривая изгибную форму потери устойчивости состояния равновесия с прямолинейной вертикальной осью колонны.

$$P_{kp} = 0,95qL^2/\Delta = 0,95 \times 77,3125 \times 400/14,4 = 2039,88 \text{ кН}. \quad (6)$$

Погрешность оценки критической нагрузки линейного анализа устойчивости (3) по сравнению с аналитическим решением (2) составляет 3,02 %.

Таблица 1

Результаты расчета критической нагрузки на основе нелинейного анализа устойчивости

№	$h, \text{ м}$	$q, \text{ кН/м}$	k	$P_{кр} = kqL, \text{ кН}$	%
1	1	77,313	1,264	1954,398	7,088
2	0,5	38,656	1,311	2026,948	3,638
3	0,25	19,328	1,335	2064,754	1,841
4	0,125	9,664	1,348	2084,067	0,923
5	0,0625	4,832	1,354	2093,824	0,459
6	0,03125	2,416	1,357	2098,725	0,226
7	0,015625	1,208	1,358	2099,916	0,169
8	0,007813	0,604	1,358	2100,024	0,165

Table 1

Results of critical load calculation based on nonlinear stability analysis

No	$h, \text{ m}$	$q, \text{ kN/m}$	k	$P_{кр} = kqL, \text{ kN}$	%
1	1	77.313	1.264	1954.398	7.088
2	0.5	38.656	1.311	2026.948	3.638
3	0.25	19.328	1.335	2064.754	1.841
4	0.125	9.664	1.348	2084.067	0.923
5	0.0625	4.832	1.354	2093.824	0.459
6	0.03125	2.416	1.357	2098.725	0.226
7	0.015625	1.208	1.358	2099.916	0.169
8	0.007813	0.604	1.358	2100.024	0.165

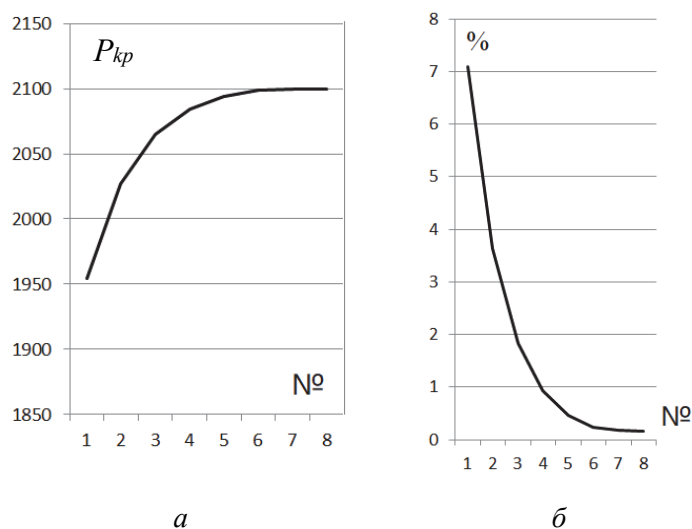


Рис. 3. Графики сходимости:
 а – величины критической нагрузки; б – погрешности при численном решении задачи устойчивости
Figure 3. Convergence graphs:
 а – the values of the critical load; б – errors in the numerical solution of the stability problem

Рассмотрим устойчивость колонны переменной изгибной жесткости при действии равномерно распределенной по высоте стойки вертикальной нагрузки. Изгибная жесткость представлена двумя величинами EJ_1 и EJ_2 , $L = h_1 + h_2$, где h_1 – участок высоты колонны с жесткостью EJ_1 , h_2 – с жесткостью EJ_2 ($EJ_1/EJ_2 = 0,355$) (рис. 4).

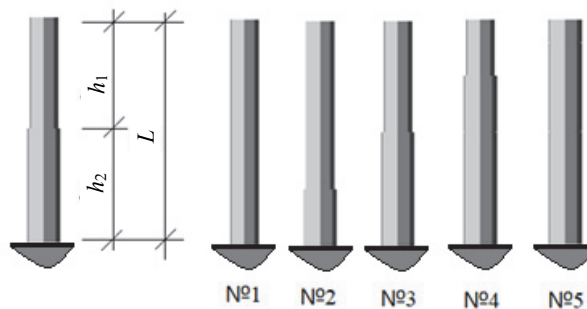


Рис. 4. Варианты расчетной схемы консольной стойки переменной изгибной жесткости
Figure 4. Variants of the design scheme of a cantilever rack of variable bending stiffness

В табл. 2 приведены результаты расчетов с различной величиной шага разбиения h , равной $L/40$ и $L/640$. В табл. 2 в столбце 1 результаты расчета критической нагрузки из решения бифуркационной задачи устойчивости, в столбце 2 результаты линейного анализа устойчивости колонны по (3). Процент расхождения результатов расчета от 2,58 до –6,43 %. На рис. 5 показаны зависимости критических нагрузок, полученных на основе нелинейного и линейного анализа устойчивости, от переменной (ступенчатой) изгибной жесткости стойки (рис. 4).

Таблица 2

Результаты нелинейного и линейного расчета критической нагрузки стойки переменной изгибной жесткости

№	h_1/h_2 , м/м	L/40			L/640		
		1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	%	1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	%
1	20/0	844,2	849,5	–0,623	874,1	849,6	2,801
2	15/5	1397,7	1520,1	–8,756	1495,9	1592,2	–6,432
3	10/10	2211,4	2150,3	2,763	2207,3	2150,3	2,586
4	5/15	2369,5	2377,8	–0,351	2454,4	2376,9	3,158
5	0/20	2379,4	2404,6	–1,059	2463,6	2394,7	2,800

Примечание: 1 – расчет критической нагрузки из решения бифуркационной задачи устойчивости; 2 – линейный анализ устойчивости колонны по (3).

Table 2

Results of nonlinear and linear calculation of the critical load of a rack of variable bending stiffness

No	h_1/h_2 , m/m	L/40			L/640		
		1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	%	1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	%
1	20/0	844.2	849.5	–0.623	874.1	849.6	2.801
2	15/5	1397.7	1520.1	–8.756	1495.9	1592.2	–6.432
3	10/10	2211.4	2150.3	2.763	2207.3	2150.3	2.586
4	5/15	2369.5	2377.8	–0.351	2454.4	2376.9	3.158
5	0/20	2379.4	2404.6	–1.059	2463.6	2394.7	2.800

Note: 1 – calculation of the critical load from the solution of the bifurcation stability problem; 2 – linear analysis of the stability of the column by (3).

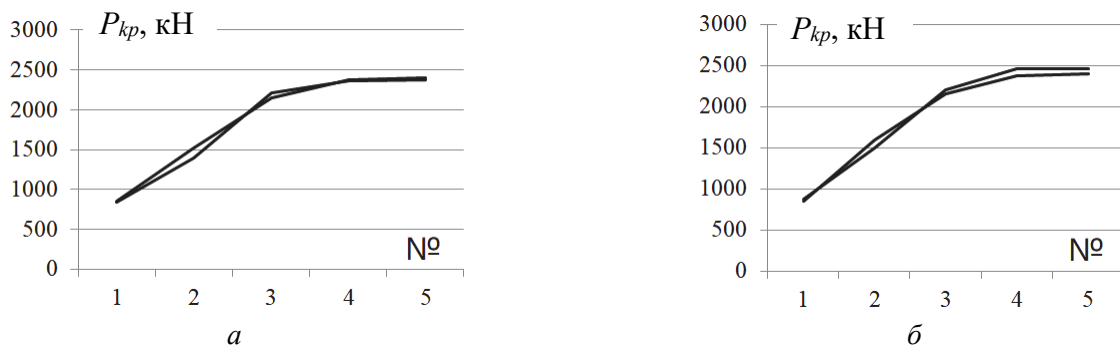


Рис. 5. Зависимости критических нагрузок, полученных на основе нелинейного и линейного анализа устойчивости, от переменной (ступенчатой) изгибной жесткости стойки












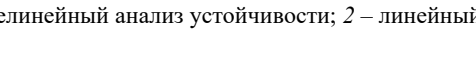

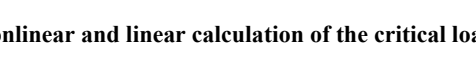
Figure 5. Dependences of critical loads obtained on the basis of nonlinear and linear stability analysis on the variable (stepwise) bending stiffness of the rack

Рассмотрим устойчивость стойки с постоянной изгибной жесткостью $EJ = 1,13 \times 10^{-4}$ кН/м² и переменной (ступенчатой) распределенной вертикальной нагрузкой $q_1 = 0,3$ кН/см, $q_2 = 0,4$ кН/см (рис. 5).

На рис. 6 показаны два варианта нагружения стойки. В табл. 3 приведены результаты расчета критических нагрузок для различных схем нагружения консольной стойки. В столбце 1 табл. 3 показана критическая нагрузка, полученная на основе нелинейного анализа устойчивости, в столбце 2 показана критическая нагрузка линейного анализа устойчивости.

Таблица 3












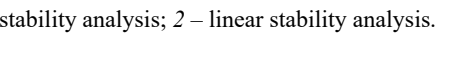


Результаты нелинейного и линейного расчета критической нагрузки стойки при различных вариантах нагружения

Варианты	Расчетные схемы, $EJ = 1,13 \times 10^{-4}$ кНм ²	1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	3, %	
А	A1		872,90	849,65	2,66
	A2		909,18	890,36	2,07
	A3		943,46	921,66	2,31
	A4		985,46	945,31	4,07
	A5		961,67	921,66	4,16
	A6		922,89	903,30	2,12
	A7		872,90	849,65	2,66
Б	Б1		872,90	849,65	2,66
	Б2		817,79	804,06	1,68
	Б3		792,85	777,55	1,93
	Б4		783,44	771,57	1,51
	Б5		819,79	800,45	2,36
	Б6		845,73	823,61	2,62
	Б7		872,90	849,65	2,66

Примечание: 1 – нелинейный анализ устойчивости; 2 – линейный анализ устойчивости.

Table 3

Results of nonlinear and linear calculation of the critical load of the rack under various loading options

Variants	Calculation schemes, $EJ = 1,13 \times 10^{-4}$ кНм ²	1, $P_{кр}$, кН	2, $P_{кр}$, кН	3, %	
А	A1		872.90	849.65	2.66
	A2		909.18	890.36	2.07
	A3		943.46	921.66	2.31
	A4		985.46	945.31	4.07
	A5		961.67	921.66	4.16
	A6		922.89	903.30	2.12
	A7		872.90	849.65	2.66
Б	Б1		872.90	849.65	2.66
	Б2		817.79	804.06	1.68
	Б3		792.85	777.55	1.93
	Б4		783.44	771.57	1.51
	Б5		819.79	800.45	2.36
	Б6		845.73	823.61	2.62
	Б7		872.90	849.65	2.66

Note: 1 – nonlinear stability analysis; 2 – linear stability analysis.

На рис. 7 показано сравнение результатов расчета критической нагрузки для различных вариантов нагружения стойки на основе нелинейного и линейного анализа устойчивости.

Рассмотрим расчет устойчивости пространственного ядра жесткости, представленного вертикальной консольной пространственной стойкой с переменной по высоте изгибной жесткостью. Поперечное сечение стойки квадратное в плане показано на рис. 8, а. Сечение в расчетных схемах представлено двумя вариантами: первый вариант представлен сплошными линиями, во втором варианте добавлены элементы, показанные штриховыми линиями. Высота стойки 60 м, толщина стен стойки по высоте изменяется каждые 10 м и равна h_j (рис. 8, а). Другие характеристики: модуль упругости 39 500 кПа, коэффициент Пуассона 0,4, вес конструкционного материала 2,5 кН/м³.

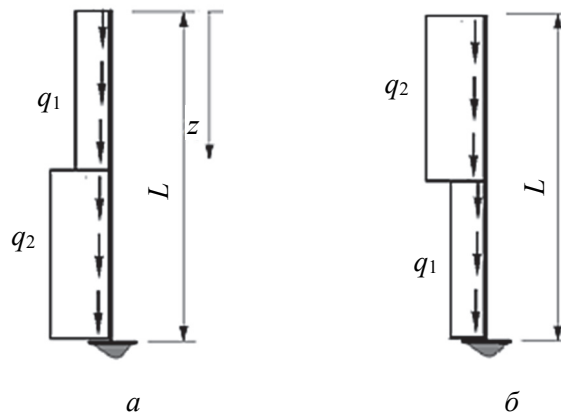


Рис. 6. Два варианта нагружения консольной стойки
Figure 6. Two options for loading the console rack

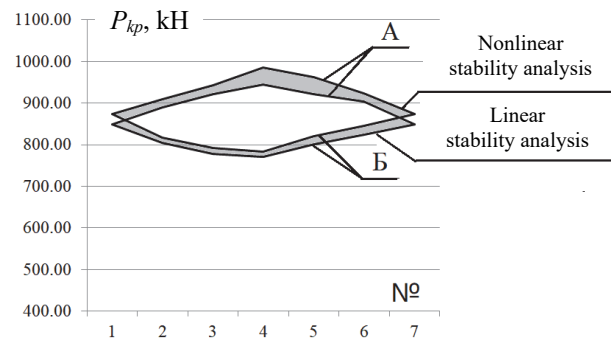
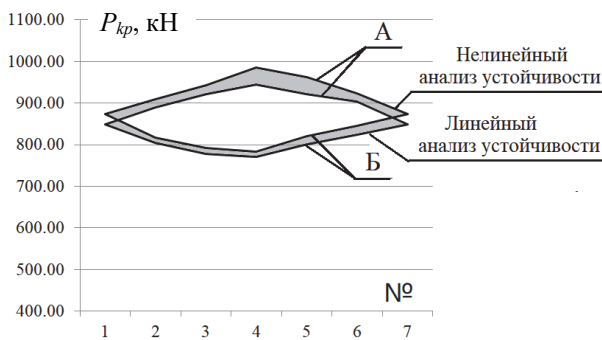


Рис. 7. Результаты расчета критической нагрузки для различных вариантов нагружения стойки на основе нелинейного и линейного анализа устойчивости

Figure 7. The results of the calculation of the critical load for various variants of the rack loading based on nonlinear and linear stability analysis

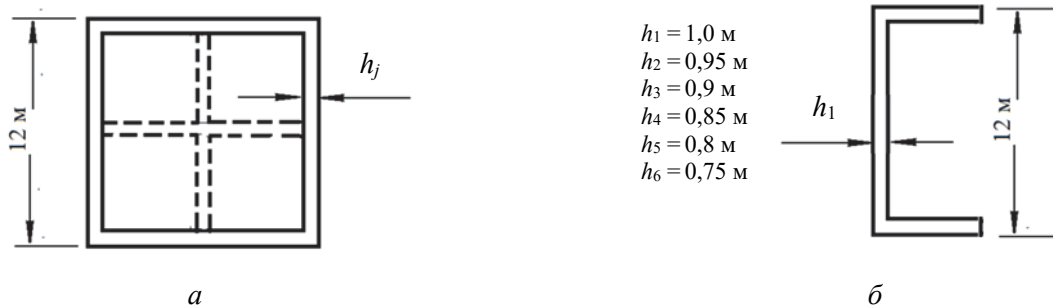


Рис. 8. Поперечные сечения расчетных схем консольной стойки
Figure 8. Cross-sections of the design schemes of the console rack

В этой задаче возникает вопрос о возможности как местной потери устойчивости, так и общей потери устойчивости изгибного типа. Вид потери устойчивости определяется гибкостью отдельных элементов стойки и гибкостью самой стойки. В качестве примера рассмотрим потерю устойчивости стойки с поперечным сечением первого варианта, стенки которого обладают значительной гибкостью.

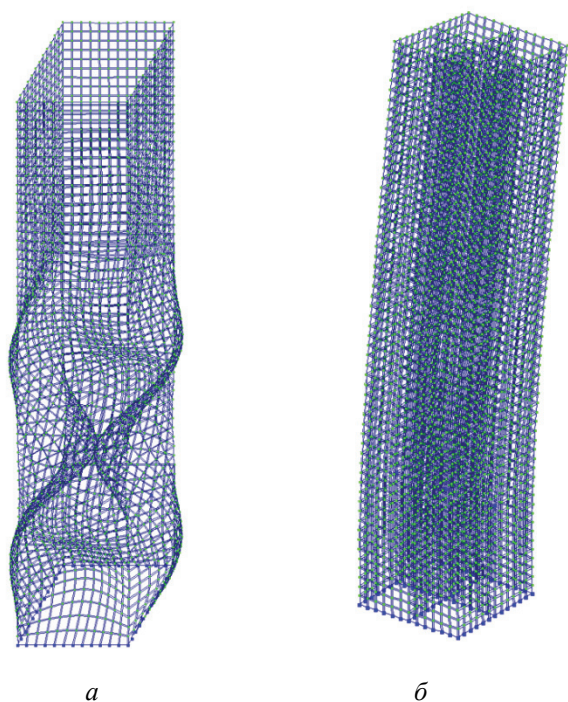


Рис. 9. Формы местной и общей потери устойчивости стойки изгибного типа
Figure 9. Forms of local and general loss of stability of the bending type strut

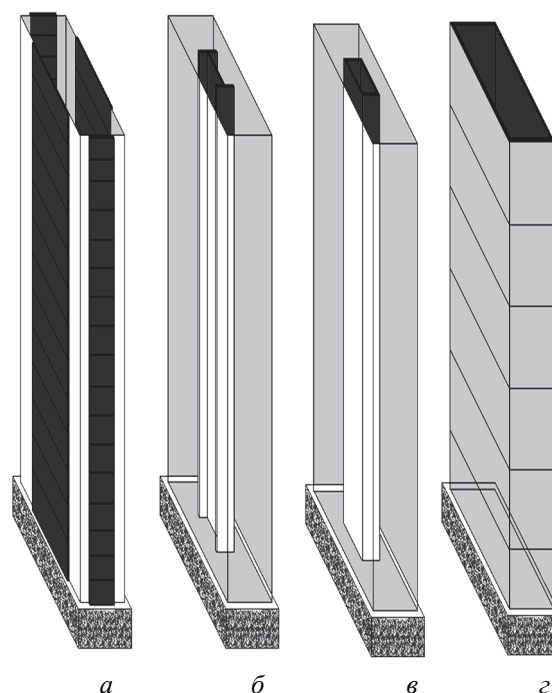


Рис. 10. Стандартные системы жесткости в основе конструкций высотных зданий:
a – с внешними несущими стенами, работающими на сдвиг;
б – с внутренними несущими стенами, работающими на сдвиг;
в – ствольного типа; *г* – трубного типа
Figure 10. Standard rigidity systems based on the structures of high-rise buildings:
a – with external load-bearing walls, working on the shift;
б – with internal load-bearing walls, working on the shift;
в – barrel type; *г* – tube type

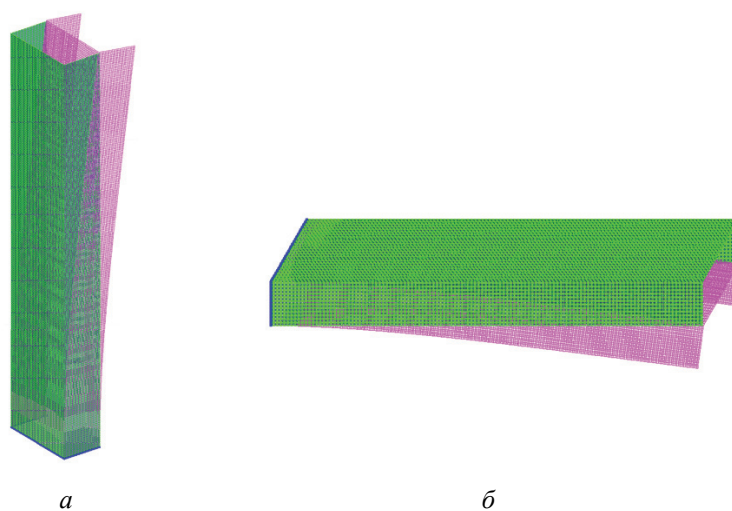


Рис. 11. Формы потери устойчивости стойки (*a*) и изгиба консольной балки (*б*)
Figure 11. Forms of rack stability loss (*a*) & bending of the cantilever beam (*б*)

Первая форма потери устойчивости стойки (местная потеря устойчивости) показана на рис. 9, *а*. Увеличение изгибной жесткости стен за счет введения в расчетную схему дополнительных элементов жесткости, показанных на рис. 7, *а* штриховыми линиями, приводит к изгибной форме потери общей устойчивости (рис. 9, *б*).

Нелинейный и линейный анализ общей устойчивости пространственного ядра жесткости рассмотрим на открытом профиле двутаврового поперечного сечения модельной стоки (рис. 8, *б*).

Здесь следует заметить, что профиль двутаврового поперечного сечения стойки является одной из стандартных системы жесткости в основе конструкций высотных зданий [15].

На рис. 10 показаны стандартные системы жесткости в основе конструкций высотных зданий.

Нелинейный анализ общей изгибной устойчивости имеет форму потери устойчивости, показанную на рис. 11, *а*.

Критическая нагрузка будет равна

$$P_{кр} = q_{кр}L = 126,9 \times 60 = 7611,5 \text{ кН.} \quad (7)$$

Результат линейного анализа устойчивости пространственного ядра жесткости, основанный на использовании формы изгиба консольной балки, нагруженной поперечной нагрузкой (рис. 11, *б*), дает критическую нагрузку следующего вида:

$$P_{кр} = 0,95qL^2/\Delta = 0,95 \times 24 \times 5,29 \times 3600 / 58,59 = 7410,89 \text{ кН.} \quad (8)$$

Таким образом, как можно было ожидать, погрешность линейного анализа устойчивости составляет 2,6 %.

Заключение

Приведенные в табл. 3 (столбец 3) результаты оценки погрешности линейного анализа устойчивости показывают, что погрешность в 16–25 раз больше по сравнению с классическими методами решения задач устойчивости. Так, методы Релея – Ритца и Галеркина в задачах устойчивости дают достаточно точные приближенные решения с погрешностью от +0,2 до +0,13 %. Однако проблема в данном случае не в методах получения приближенного решения задачи устойчивости, а в получении соответствующих точности применяемых методов значений исходных параметров расчетной схемы. На общую устойчивость несущей системы высотного здания оказывает влияние множество факторов. Это и расчетные характеристики нагружения, и неизменно присутствующий «разброс» прочности конструкционного материала и начальных геометрических несовершенств в виде неперпендикулярности, непрямолинейности, эксцентриситетов и перекосов крепления элементов и т. д. Большое влияние на общую устойчивость имеет грунтовое основание фундаментных конструкций высотного здания, которое также имеет большой «разброс» деформационных и прочностных характеристик. Следовательно, в каждом конкретном случае полученную погрешность линейного анализа устойчивости надо сопоставлять с допустимой погрешностью значений исходных параметров расчетной схемы высотного здания. Как показывают проведенные расчеты, линейная модель анализа устойчивости консольной стойки может входить в серию простых (инженерных) моделей, каждая из которых описывает отдельную характерную проблему расчета при проектировании того или иного сооружения. В данном случае линейная модель позволяет получить предварительную оценку критической нагрузки для тестирования результатов компьютерного расчета по более сложным моделям общей устойчивости равновесия несущего ствола высотного объекта.

Список литературы

1. Жесткова С.А., Иноземцев В.К. Бифуркационные задачи устойчивости, высотного объекта // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016. № 4. С. 53–57.
2. Жесткова С.А., Иноземцева О.В., Иноземцев В.К. Деформации крена высотного объекта на деформируемой плите // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 2. С. 74–78.
3. Жесткова С.А., Иноземцева О.В., Иноземцев В.К., Редков В.И. Расчет общей устойчивости конструкций с высоко расположенным центром сил тяжести // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 5. С. 61–65. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2017-5-61-65>

4. Жесткова С.А., Иноземцев В.К. Общая устойчивость системы с высокорасположенным центром сил тяжести // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2018. № 21. С. 156–159.
5. Иноземцева О.В., Иноземцев В.К., Муртазина Г.Р. Устойчивость против опрокидывания в практике проектирования высотных зданий // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 228–247. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-228-247>
6. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы. М.: СКАД СОФТ, 2010. 704 с.
7. Bazant Z.P., Cedolin L. Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories. Mineola: Dover Publications Inc., 2003.
8. Sadd M.H. Elasticity: theory, application and numerics. 4th ed. Academic Press, 2020. 624 p.
9. Patel A. Geotechnical investigations and improvement of ground conditions. 1st ed. Woodhead Publishing, 2019. 209 p.
10. Ratner L.W. Non-linear theory of elasticity and optimal design. 1st ed. Elsevier Science, 2003. 279 p.
11. Леви-Чивита Т., Амальди У. Теоретическая механика: в 4 т. Т. 1. Ч. 2. М., 1962.
12. Рабинович И.М. Вопросы теории статического расчета с сооружений с односторонними связями. М.: Стройиздат, 1975.
13. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory // Proceeding of the Royal Society. Ser. A. 2000. Vol. 456. No 8. Pp. 2223–2242. <https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0610>
14. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Устойчивость равновесия конструкций и родственные проблемы: в 3 т. М.: СКАД СОФТ, 2011. 400 с.
15. Энгель Х. Несущие системы / предисл. Р. Рапсона; пер. с нем. Л.А. Андреевой. М.: АСТ: Астрель, 2007. 344 с.

References

1. Zhestkova S.A., Inozemtsev V.K. Bifurcation problems of stability of high-rise buildings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016;(4):53–57. (In Russ.)
2. Zhestkova S.A., Inozemtseva O.V., Inozemtsev V.K. List's deformations of high-rise building on deformable slab. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(2):74–78. (In Russ.)
3. Zhestkova S.A., Inozemtseva O.V., Inozemtsev V.K., Redkov V.I. Calculation of overall sustainability of structures with the high centre of gravity. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017;(5):61–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2017-5-61-65>
4. Zhestkova S.A., Inozemtsev V.K. General stability of a system with a highly located center of gravity. *Bulletin of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2018;(21):156–159. (In Russ.)
5. Inozemtseva O.V., Inozemtsev V.K., Murtaзина G.R. Roll-over stability as a problem of high-rise buildings' designing. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(3):228–247. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-3-228-247>
6. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Stability of the equilibrium of structures and related problems*. Moscow: SCUD SOFT Publ.; 2010. (In Russ.)
7. Bazant Z.P., Cedolin L. Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories. Mineola: Dover Publications Inc., 2003.
8. Sadd M.H. *Elasticity: theory, application and numerics*. 4th ed. Academic Press, 2020.
9. Patel A. *Geotechnical investigations and improvement of ground conditions*. 1st ed. Woodhead Publishing, 2019.
10. Ratner L.W. *Non-linear theory of elasticity and optimal design*. 1st ed. Elsevier Science, 2003.
11. Levi-Civita T., Amaldi U. *Lezioni di meccanica razionale* (vol. 1, part 2). Bologna: Zanichelli; 1923.
12. Rabinovich I.M. *Questions of the theory of static analysis from structures with one-way connections*. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1975. (In Russ.)
13. Schulz M., Pellegrino S. Equilibrium paths of mechanical systems with unilateral constraints. Part I. Theory. *Proceeding of the Royal Society. Ser. A*. 2000;456(8):2223–2242. <https://doi.org/10.1098/rspa.2000.0610>
14. Perelmuter A.V., Slivker V.I. *Equilibrium stability of structures and related problems* (vol. II). Moscow: SKAD SOFT Publ.; 2011. (In Russ.)
15. Engel H. Carrier systems (R. Rapson, Preface; L.A. Andreeva, Transl.). Moscow: AST Publ., Astrel Publ.; 2007. (In Russ.)