

УДК.624.04.

**ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ОСНОВНЫМИ РАСЧЕТНЫМИ
ПАРАМЕТРАМИ, УЧИТЫВАЮЩИМИ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ
РАБОТУ КАРКАСА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ**

Зернов Владимир Викторович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г.Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Зайцев Михаил Борисович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г.Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Аннотация

В статье получена зависимость между коэффициентом пространственной работы и коэффициентом упругой податливости для расчета рам пространственного каркаса на устойчивость. Полученная зависимость применима для любой одноэтажной рамы, как со ступенчатыми стойками, так и с их постоянным сечением.

Ключевые слова: Промышленное здание, стальной каркас, пространственная работа каркаса, расчет на устойчивость, коэффициент упругой податливости, коэффициент пространственной работы.

**THE RELATIONSHIP BETWEEN THE MAIN DESIGN PARAMETERS
THAT TAKE INTO ACCOUNT THE SPATIAL OPERATION OF THE
FRAME OF INDUSTRIAL BUILDINGS**

Zernov Vladimir Victorovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Mechanics".

Zaytsev Mihail Borisovich,

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Mechanics”.*

Abstract

The dependence between the coefficient of spatial work and the coefficient of elastic compliance for calculating the frames of a spatial framework for stability is obtained in the article. The obtained dependence is applicable to any single - storey frame, both with stepped posts and with their constant cross-section.

Keywords: Industrial building, steel frame, spatial work of the frame, calculation of stability, coefficient of elastic compliance, coefficient of spatial work.

Теоретические и экспериментальные исследования пространственной работы конструкций одноэтажных промышленных зданий (Рис.1), показывают существенные различия между работой поперечной рамы и пространственной системы благодаря наличию продольных конструкций: связей, подкрановых путей, дисков покрытий и др., соединяющих плоские рамы в пространственный каркас. Действительные величины усилий и напряжений, а также горизонтальных перемещений пространственной системы получается, как правило, значительно ниже величин, рассчитанных в предположении раздельной работы плоских рам [1-2].

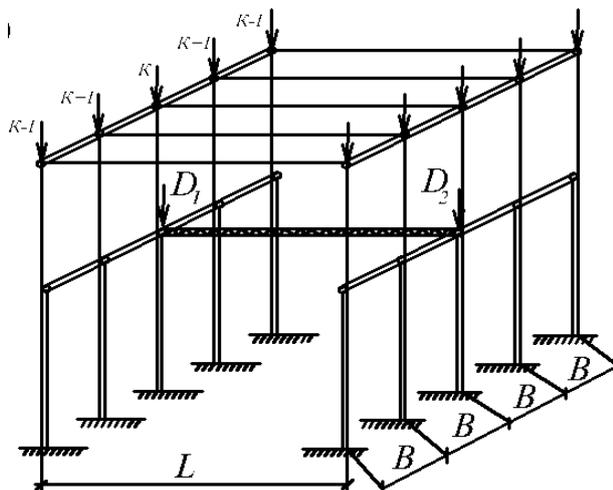


Рисунок 1 – Расчетная схема пространственного каркаса

Основной нагрузкой, при которой пространственная работа стального каркаса промышленного здания оказывается наиболее существенной, является крановая нагрузка, вызывающая наибольшие усилия в продольных конструкциях.

Существует методика расчета поперечных рам с учетом пространственной работы, согласно которой расчет поперечных рам с учетом пространственной работы сводится к расчету плоской рамы, имеющей на уровне ригеля упругую опору, уменьшающую горизонтальное перемещение ригеля (рис. 2). Упругой опорой являются продольные горизонтальные связи и диски покрытия.

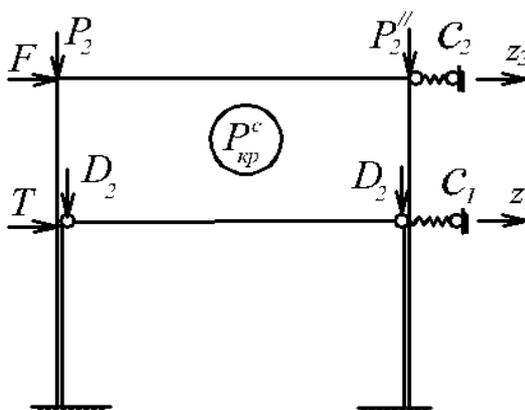


Рисунок 2 – Упрощенная расчетная схема рамы при расчете на устойчивость

Учет пространственной работы поперечной рамы сильно влияет на ее общую устойчивость от горизонтального смещения ригеля и на уровне подкрановых балок. Значение критической нагрузки для такой рамы очень чувствительно к возможному горизонтальному смещению ригеля, зависящему от коэффициента упругой податливости C_2 . Таким образом, необходимость учета пространственной работы поперечной рамы при проверке ее общей устойчивости еще больше возрастает по сравнению с расчетом на прочность (при определении внутренних сил в расчетных сечениях колонн).

Если при практических расчетах поперечных рам[3-5] для определения расчетных усилий предлагается вести учет пространственной работы каркаса, пусть даже приближенно - одним коэффициентом α_{np} , то при проверке устойчивости с использованием расчетных длин отдельных ступеней колонн пространственная работа каркаса совсем не учитывается.

При разрезных подкрановых балках и тормозных конструкциях величина отпора в местах крепления их к колоннам (на уровне верха отметки балки) незначительна и практически не влияет на величину и распределение усилий. Поэтому в расчетной схеме рамного блока упругоподатливую связь C_1 на уровне подкрановых балок можно не учитывать. Такая рама с упругоподатливыми связями только на уровне ригеля показана на рис. 3.

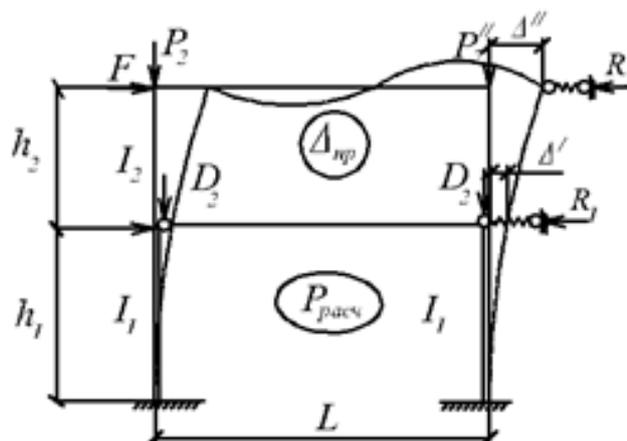


Рисунок 3 – Упрощенная расчетная схема рамы с упругоподатливыми связями только на уровне ригеля

Принятое допущение дает возможность получить аналитическую зависимость коэффициента C_2 с используемым коэффициентом Δ_{np} , учитывающим пространственную работу каркаса при статическом расчете рамы с мостовыми кранами для определения внутренних усилий M , Q и N в расчетных сечениях.

Приведем вывод зависимости между C_2 и α_{np} для плоской рамы со ступенчатыми стойками (рис.3) при действии расчетных нагрузок F , P и D . Для этой рамы отношения $\alpha_{np} = \Delta_{np} / \Delta_2$, выраженные через перемещения ригеля можно назвать коэффициентом пространственной работы.

В этом равенстве:

Δ_{np} - перемещение ригеля рамы “к” в пространственном блоке;

$\Delta = \Delta_2$ - перемещение ригеля плоской рамы, соответствующее вычислениям от действия расчетных нагрузок (условно обобщены F).

Для этого случая загрузки справедливо равенство

$$\alpha_{np} = \Delta_{np} / \Delta = 1 - R / F = 1 - \alpha, \text{ где } R = \alpha F; \quad (1)$$

R - реакция упругоподатливой опоры от действия любой горизонтальной силы F .

С другой стороны можно записать $R = C_2 \Delta_{np}$, где размерность C_2 [кН/м], тогда $\alpha_{np} = 1 - C_2 \Delta_{np} / F$, откуда

$$F = C_2 \Delta_{np} / (1 - \alpha_{np}). \quad (2)$$

Последние равенства справедливы при:

$$C_2 = 0, F = 0 \text{ и } R = 0, \text{ при } C_2 = \infty, R = \infty,$$

при $\Delta_{np} = 1$, чему соответствует $Z_2 = 1$ - по методу перемещений равенства (2) можно записать

$$F = r_{22}^C = r_{22}^0 + C_2 = C_2 / (1 - \alpha_{np})$$

Из последнего равенства получаем общее выражение для коэффициента упругой связи на уровне ригеля рамы

$$C_2 = r_{22}^0 (1 - \alpha_{np}) / \alpha_{np} \quad (3)$$

где r_{22}^0 - реакция в линейной связи на уровне ригеля от $\Delta_{rig}'' = Z_2 = 1$

Значение r_{22}^0 - выражает жесткость заданной рамы горизонтальным перемещениям на уровне ригеля. Для определения этой реакции без учета продольных сил в стойках рамы могут быть использованы известные приемы строительной механики. При практических расчетах для этой цели могут быть использованы приближенные формулы, в частности для ступенчатой стойки со свободным концом:

$$r_{22}^0 = 3EI_n / H^3 c, \text{ где } c = 1 + \alpha^3 \mu \quad (3, a)$$

Здесь коэффициент c учитывает переменность сечения.

Для ступенчатой стойки с заземленным, но подвижным верхним концом (2-й случай) формула для определения r_{22}^0 в развернутом виде имеет довольно сложный вид:

$$r_{22}^0 = \frac{12 \cdot \left[1 + \frac{h_1}{H} \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] \cdot EI_1 / H^3}{4 \left[1 + \frac{h_2}{H} \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{h_2}{H} \right)^3 \cdot \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right] - \left[1 + \left(\frac{h_2}{H} \right)^3 \left(\frac{I_1}{I_2} - 1 \right) \right]^2} \cdot 3 \quad (3, б)$$

В таком виде эта формула более удобнее при составлении программы для проверки общей устойчивости поперечной рамы с учетом пространственной работы с использованием выражения C_2 по (3.3).

В полученной формуле (3.3) коэффициент упругого отпора α_{np} , а далее – коэффициент C_2 , можно определить по таблицам в зависимости от параметра β , характеризующего соотношения жесткостей поперечной рамы и покрытия

$$\beta = B^3 \sum I_n d / H^3 I_n, \quad (4)$$

здесь: B – шаг поперечных рам; H – высота колонны; $\sum I_n$ – сумма моментов инерции нижних частей колонн; d – коэффициент, с помощью которого учитывается переменность сечения колонны; $I_n = I_{св} + I_{кр}$; $I_{св}$ – момент инерции продольных связей по нижним поясам; $I_{кр}$ – эквивалентный момент инерции дисков покрытия.

Продольные элементы покрытия можно рассматривать как неразрезные балки, опирающиеся на поперечные рамы, которых достаточно принять равным пяти в блоке каркаса, тогда получается четырех пролетная балка на упругих опорах (рис. 4).

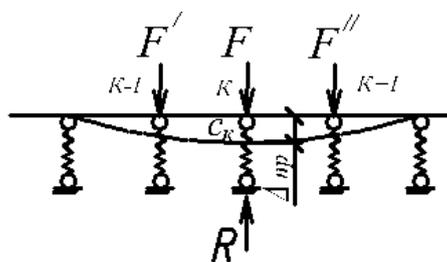


Рисунок 4 – Четырех пролетная балка на упругих опорах

Более точное решение получается с учетом влияния загрузки смежных рам крановой нагрузкой. Для практических расчетов достаточно рассмотреть влияние загрузки двух смежных рам по отношению к рассматриваемой (рис. 5), при этом величина упругого отпора получается с учетом ординат линии влияния по формуле:

$$\alpha_{np} = 1 - \alpha - \alpha' (n_0 / \sum y - 1), \quad (5)$$

где $\sum y$ - сумма ординат л.в. реакции рассматриваемой рамы;

n_0 - число колес кранов на одной нитке подкрановой балки;

α' - числовой коэффициент, зависящий от β по (5).

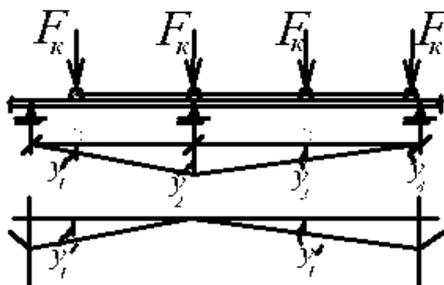


Рисунок 5 – Загрузка смежных рам крановой нагрузкой

Приведенная выше формула (3) для определения коэффициента упругой связи C_2 , учитывающего пространственную работу поперечной рамы каркаса несколько отличается от формулы, предложенной А.Н. Гениевым и Е.И. Беленя.

В их работах эта формула представлена в виде

$$\gamma = \frac{1}{u} \cdot \frac{h_2^3}{EI_2} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \frac{1}{d} \left(\frac{h_2}{h_1 + h_2} \right)^3 \frac{I_1}{I_2} \quad (6)$$

Здесь γ - безразмерный коэффициент упругого отпора ригеля рамы

горизонтальному смещению, α и d - параметры, определяемые по графикам в зависимости от геометрических размеров рамы $n = h_2 / h_1$, от числа рам в блоке и от коэффициента β по (4).

Существенным недостатком этой формулы по сравнению предложенной выше (3) является то, что она применима для учета пространственной работы только симметричной однопролетной рамы. В ней I_1 и I_2 - моменты инерции нижней и верхней ступени колонн рамы. Она не учитывает также изгибную жесткость решетчатого ригеля EI_p .

Полученная в данной статье формула (3) более общая, применима для любой одноэтажной рамы, как со ступенчатыми стойками, так и с постоянным сечением их. Особенно она удобна при расчете поперечной рамы с использованием ПЭВМ, так как по соответствующей программе будут определяться элементы матрицы жесткости, включая r_{22}^0 . Поэтому при численном значении α_{np} , вычисленном по (5), легко получается коэффициент упругой горизонтальной связи C_2 на уровне ригеля рамы.

После определения коэффициента упругой связи C_2 по формуле (3) расчет рамы на устойчивость может быть выполнен на ПЭВМ по соответствующей программе или же известным методом перемещений с использованием вспомогательных таблиц для реакций r_{jk}^N от единичных перемещений. Для такой симметричной рамы (рис. 3) неизвестными перемещениями будут:

Z_1 - горизонтальное перемещение для уровня ступени (горизонтальной связи, имитирующей мостовой кран);

Z_2 - перемещение ригеля;

Z_3 - поворот сечений на уровне ступеней колонн;

Z_4 - поворот узлов на уровне ригеля.

Для определения критического параметра продольных сил

$$v_2 = \sqrt{\frac{N_2 h_2^2}{EI_2}} \sqrt{\frac{Ph}{i_2}} \quad (7)$$

необходимо составить и раскрыть определитель 4-го порядка

$$D(R) = D[r_{jk}(v_2, i_k)] = 0. \quad (8)$$

Кроме метода перемещений для определения $P_{кр}$ можно использовать известный энергетический метод. Этот метод приближенный, но во многих случаях дает более простое аналитическое решение, соответствующее принятому выражению уравнения изогнутой оси сжатых стоек колонн.

Выводы:

1. Получена зависимость между коэффициентом пространственной работы α_{np} и коэффициентом упругой податливости C_2 для расчета рам пространственного каркаса на устойчивость.
2. Полученная зависимость применима для любой одноэтажной рамы, как со ступенчатыми стойками, так и с их постоянным сечением.

Библиографический список:

1. Золина, Т. В. Вероятностный расчет одноэтажного промышленного здания, оборудованного мостовым краном, с учетом пространственной работы его каркаса / Т. В. Золина // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 28(47). – С. 7-13. – EDN PEJZSX.
2. Павелко, А. А. Исследование пространственной работы рамно-связевого каркаса одноэтажного промышленного здания с мостовыми кранами / А. А. Павелко, А. Л. Балускин // Семьдесят третья всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: Сборник материалов конференции, в 2 ч., Ярославль, 20 апреля 2020 года. Том Часть

2. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2020. – С. 683-686. – EDN HGBKVM.

3. Зернов, В. В. Методика расчета стальных рам промышленных зданий с использованием различных форм потери устойчивости по деформированной схеме / В. В. Зернов, М. Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 1(38). – С. 143-148. – EDN ZKBLJN.

4. Зернов, В. В. Определение критической нагрузки внецентренно сжатых колонн двутаврового сечения в упругопластической стадии / В. В. Зернов, М. Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – № 11. – С. 107-112. – EDN ZYLRPV.

5. Зернов, В. В. Алгоритм итерационного метода деформационного расчета плоских рам одноэтажных промышленных зданий на различные нагрузки и проверка их общей устойчивости / В. В. Зернов, М. Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2018. – № 7. – С. 9. – EDN XOPLXF.