

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,***

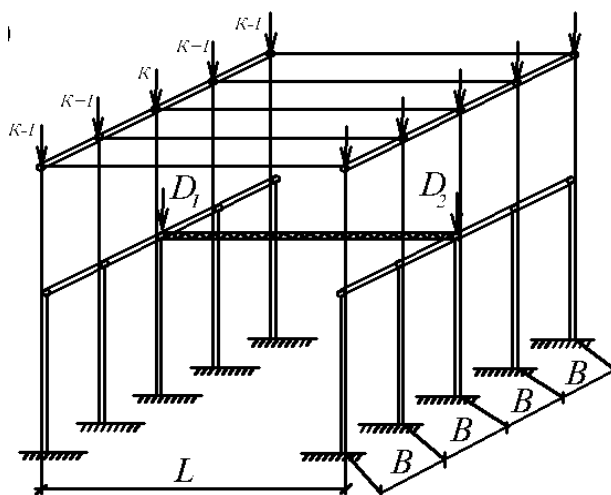
*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,  
Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Mechanics”.*

## **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.

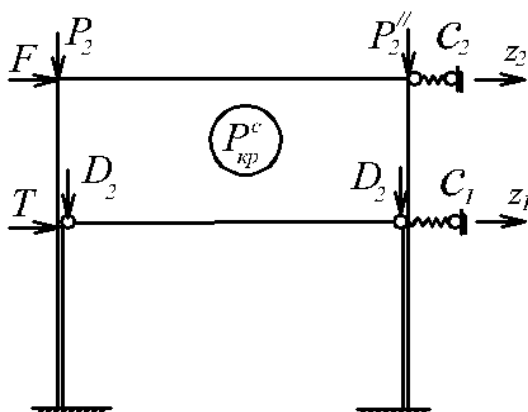


Рисунок 2 – Упрощенная расчетная схема рамы при расчете на устойчивость

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  $\alpha_{np}$ , 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.

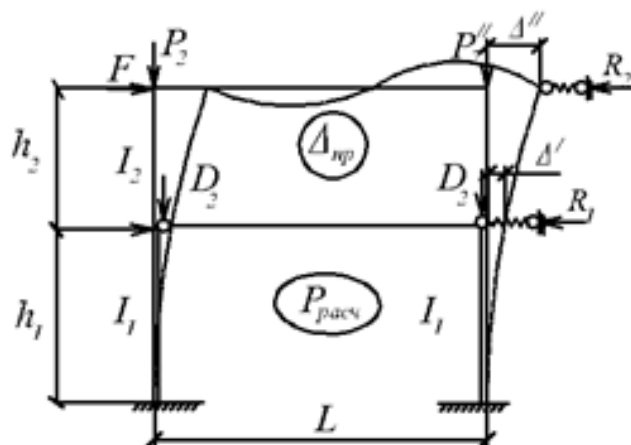


Рисунок 3 – Упрощенная расчетная схема рамы с упругоподатливыми связями только на уровне ригеля

Принятое допущение дает возможность получить аналитическую зависимость коэффициента  $C_2$  с используемым коэффициентом  $\Delta_{np}$ , 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  $\alpha_{np}$  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:

$\Delta_{np}$  - 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  $\alpha_{np}$ , а далее – коэффициент  $C_2$ , можно определить по таблицам в зависимости от параметра  $\beta$ , 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).

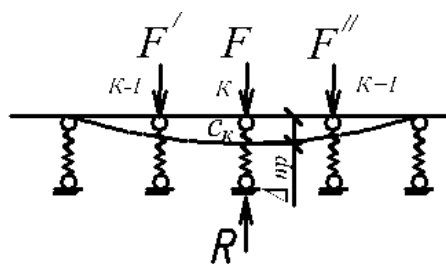


Рисунок 4 – Четырех пролетная балка на упругих опорах

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;

$\alpha'$  - числовой коэффициент, зависящий от  $\beta$  по (5).

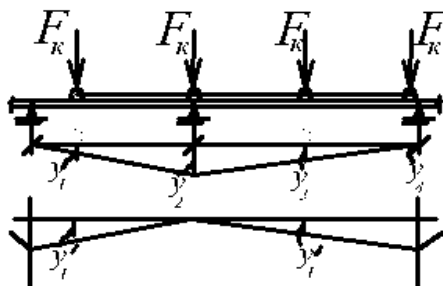


Рисунок 5 – Загрузка смежных рам крановой нагрузкой

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  $\gamma$  - безразмерный коэффициент упругого отпора ригеля рамы

горизонтальному смещению,  $\alpha$  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  $\beta$  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  $\alpha_{np}$ , 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  $\alpha_{np}$  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.