

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЯСЕ РИГЕЛЯ РАМНОГО УЗЛА

Дмитрий Перминов, Елена Перминова

Национальная академия природоохранного и курортного строительства  
Адрес: 95493, Украина, г. Симферополь, ул. Киевская, 181  
e-mail: [dmitriy714@mail.ru](mailto:dmitriy714@mail.ru)

**Аннотация:** Рассматривается методика определения напряжений в поясе ригеля рамного узла стального каркаса с колонной коробчатого сечения. Предлагаемая методика основана на определении прогиба стенки колонны методами теории упругости и дальнейшем расчете с помощью программного комплекса.

**Ключевые слова:** колонна, стенка, прогиб, пояс, напряжения, жесткость.

### ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее распространение при строительстве получили стальные рамные и рамно-связевые каркасы, что обусловлено их хорошей работой при воздействии внешних нагрузок. Жесткость зданий с рамным каркасом обеспечивается надежностью узлового сопряжением ригеля с колонной. Надежность строительной конструкции определяется работой ее элементов, точностью расчета и выбором наиболее эффективного конструктивного решения узлов сопряжения ригеля с колонной.

Стальные каркасы многоэтажных зданий в основном имеют рамную систему, которая состоит из жестко соединенных между собой ригелей и колонн, образующих плоские и пространственные рамы, объединенные междуэтажными перекрытиями. Применение такой системы обусловлено предположением, что рамный каркас более податлив, чем связевой, при учете работы его элементов в упругопластической стадии. Стальные колонны многоэтажных каркасов рамного типа следует проектировать коробчатого сечения, а ригели – из прокатных двутавров.

В отечественных нормах не уделялось и не уделяется должного внимания проектированию узловых соединений. В некоторых случаях конструктивная схема сопряжения элементов рассматривается с технологических позиций.

Исследования работы рамных узлов, применяемых в отечественной и зарубежной строительной практике, показывают, что наиболее уязвимым местом является зона сварных швов, прикрепляющих пояса ригеля к стенке колонны. Наличие концентраторов напряжений и дефектов в зоне сварных швов, вероятность появления которых в условиях строительной площадки увеличивается,

при высоких напряжениях в поясах ригеля может приводить к разрушению.

В связи с этим, необходимо определить наиболее выгодное конструктивное решение рамного узла, позволяющее снизить максимальные напряжения в околошовной зоне в поясе ригеля. Данная проблема давно решается, но многие вопросы еще остаются открытыми, одним из которых является определение значения коэффициента концентрации нормальных напряжений (далее коэффициента концентрации напряжений) в околошовной зоне в поясе ригеля. Коэффициент концентрации напряжений определяется как отношение максимального нормального напряжения к номинальному в рассматриваемой точке.

Также стоит отметить, что на практике возникает проблема адекватности расчета рамных узлов. В большинстве случаев это связано с отсутствием полной информации по фактическому напряженному состоянию рамного узла. Кроме того, по формулам определяются усредненные значения, и методика расчета элементов рамного узла основана на допущениях, исключающих возможность появления концентрации напряжений. Это приводит к тому, что основные положения расчета не отражают действительную работу конструкции.

Исходя из выше изложенного следует, что поиск путей повышения несущей способности узлов за счет оптимизации конструкции и разработки точных методик расчета является актуальным.

### АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным конструктивным решением рамных узлов, которые наиболее распространены в

отечественной и зарубежной строительной практике, являются сопряжения ригеля с колонной двутаврового сечения на горизонтальных и вертикальных накладках. В таком конструктивном решении узла стенка и пояс колонны двутаврового сечения находятся в сложном напряженном состоянии, поэтому необходимо устанавливать в колонне в уровне горизонтальных накладок диафрагмы, приваренные к стенке и поясам колонны. Кроме того, наряду с рассмотренным решением, получило распространение конструктивное решение рамного узла без горизонтальных накладок, когда пояса ригеля непосредственно соединяются сварным стыковым швом с поясом колонны. Преимуществом данного узла является снижение металлоемкости и трудоемкости на монтаже, так как уменьшается длина монтажных сварных швов, а также исключается необходимость изготовления горизонтальных накладок сложной геометрической формы. Указанные конструкции рамных узлов с двутавровым ригелем и колоннами двутаврового или коробчатого сечения могут применяться при проектировании как в обычных, так и в сейсмоопасных районах.

Для исследований была выбрана конструкция рамного узла с двутавровым ригелем и с колонной коробчатого сечения, применяемая при строительстве в обычных и сейсмических районах (рис. 1). Проанализировав исследования таких конструктивных решений рамных узлов [1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11] можно сделать вывод, что наиболее нагруженными элементами являются: пояс ригеля; сварной шов, прикрепляющий пояс ригеля к стенке колонны; стенка колонны в пределах высоты ригеля. Поэтому основной целью дальнейших исследований является определение распределения напряжений в поясе ригеля.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО РЕЗУЛЬТАТЫ

С этой целью определим распределение напряжений в поясе ригеля и найдем прогиб стенки

колонны  $w$  методами теории упругости. Представим стенку колонны как пластину, которая с двух противоположных краев закреплена (рис. 2).

К пластине приложена распределенная нагрузка  $q$  вдоль оси  $x$ . Стороны пластины, параллельные оси  $y$ , закреплены жестко, а стороны, параллельные оси  $x$ , – свободно оперты.

Зададим граничные условия:

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } x = 0 \text{ и } x = a \\ w = 0 \text{ и } \frac{\partial w}{\partial x} = 0. \end{array} \right\}, \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{При } y = 0 \text{ и } y = b \\ w = 0 \text{ и } \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0. \end{array} \right\}$$

При исследовании вопроса об изгибе стенки колонны как пластины воспользуемся решением М. Леви. Условия (1) будут удовлетворены, если примем в качестве частного решения уравнение прогиба:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D}. \quad (2)$$

Выражение для прогиба пластины представим в форме бесконечного ряда:

$$w_n = \sum_{n=1}^{\infty} X_n \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (3)$$

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЯСЕ РИГЕЛЯ

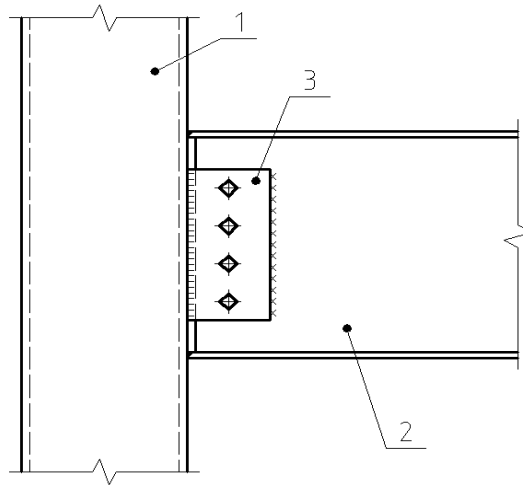


Рис. 1. Рамный узел: 1- колонна коробчатого сечения; 2 - ригель; 3 - шпальник  
 Fig. 1. Moment-resisting knot: 1 column of box-shaped section; 2 - beam; 3 – inlay

В результате подстановок и преобразований получим выражение для определения прогиба в виде:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0}{\beta_n^5} [1 + F_n \operatorname{sh} \beta_n x - \operatorname{ch} \beta_n x + E_n \beta_n x \operatorname{sh} \beta_n x - \quad (4)$$

$$- F_n \beta_n x \operatorname{ch} \beta_n x] \sin \frac{n\pi y}{b},$$

где  $K_0 = \frac{2q}{Db^2\pi n} \sin \frac{n\pi x_0}{a} \sin \frac{n\pi m}{2a}$ ,  $D$  – цилиндрическая жесткость, коэффициентов при

$$\text{переменных } F_n = \frac{\operatorname{ch} \beta_n a - 1}{\operatorname{sh} \beta_n a + \beta_n a},$$

$$E_n = \frac{\operatorname{sh} \beta_n a}{\operatorname{sh} \beta_n a + \beta_n a}.$$

С помощью выражения (4) можно определить прогиб в любой точке стенки колонны при различном значении распределенной нагрузки.

Для упрощения расчета будем использовать положения рассмотренные в [12].

Для практического использования предлагается сводная таблица 1. Для определения

прогиба пластины достаточно табличные значения относительного прогиба умножить на соотношение

заданных величин  $\frac{b_i^3}{t_i^3}$ , где  $t_i$  – толщина пластины.

Максимальный прогиб в центре пластины:

$$w_{\max} = \frac{2q \sin \frac{n\pi x_0}{a} \sin \frac{n\pi m}{2a} \sin \frac{n\pi x}{a}}{D\pi^6} \times \quad (5)$$

$$\times b^3 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n}\right)^6 \times$$

$$\times \left[ 1 - \frac{\operatorname{sh} \alpha_n + \alpha_n \operatorname{ch} \alpha_n}{\operatorname{sh} \alpha_n \operatorname{ch} \alpha_n + \alpha_n} \right],$$

$$\text{где } \alpha_n = \frac{n\pi a}{2b}.$$

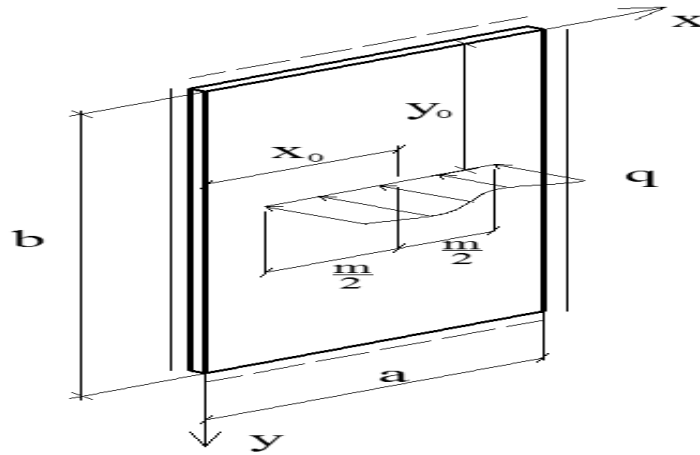


Рис. 2. Схема пластины  
Fig. 2. Plate scheme

Таблица 1. Относительный прогиб пластины  
Table 1. Relative sagging plates

$V = \frac{m}{a}$	Значения относительного прогиба пластины $w \cdot 10^6$ в точке с относительными координатами (мм) при нагрузке $q = 10 \text{кН/а}$								
	г. 1 (0,1a)	г. 2 (0,2a)	г. 3 (0,3a)	г. 4 (0,4a)	г. 5 (0,5a)	г. 6 (0,6a)	г. 7 (0,7a)	г. 8 (0,8a)	г. 9 (0,9a)
1	0.030	0.085	0.139	0.176	0.189	0.176	0.139	0.085	0.030
0.8	0.028	0.083	0.136	0.173	0.186	0.173	0.136	0.083	0.028
0.6	0.022	0.070	0.121	0.157	0.170	0.157	0.121	0.070	0.022
0.4	0.015	0.049	0.090	0.122	0.134	0.122	0.090	0.049	0.015
0.2	0.008	0.025	0.047	0.067	0.075	0.067	0.047	0.025	0.008

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЯСЕ РИГЕЛЯ

Как видно прогиб пластины зависит от соотношения ее сторон  $b/a$ . Обозначим переменную часть выражения (5) через  $\psi$ :

$$w_{\max} = \frac{2q \sin \frac{n\pi x_0}{a} \sin \frac{n\pi m}{2a}}{D\pi^6} \times \times b^3 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{n}\right)^6 \left[ 1 - \frac{\operatorname{sh}\alpha_n + \alpha_n \operatorname{ch}\alpha_n}{\operatorname{sh}\alpha_n \operatorname{ch}\alpha_n + \alpha_n} \right]. \quad (6)$$

Этот ряд сходиться очень быстро. Уже второй член ряда при  $n=3$  на несколько порядков меньше первого, что позволяет учитывать в дальнейшем только его первый член. График функциональной зависимости  $\psi\left(\frac{b}{a}\right)$  показан на рис. 3.

Функция  $\psi\left(\frac{b}{a}\right)$  имеет вид экспоненты и хорошо аппроксимируется выражением:

$$\psi\left(\frac{b}{a}\right) = 1 - e^{-a/b}. \quad (7)$$

Разница между значениями функций, вычисленных по формулам (6) и (7), находятся в допустимых пределах. Для дальнейших расчетов будем брать значения функции  $\psi\left(\frac{b}{a}\right)$  по формуле (6).

Заделка краев пластины существенно влияет на величину наибольшего прогиба пластины при действии распределенной нагрузки. Кроме того, величина наибольшего прогиба зависит от соотношения сторон пластины с жесткой заделкой и свободно опертых и имеет вид гиперболы (рис. 3). Если пластина имеет весьма вытянутый прямоугольный контур (например  $b/a > 4$ ), то прогиб и напряжения в пластине быстро приближаются к тем значениям, которые соответствуют бесконечно длинным пластинам.

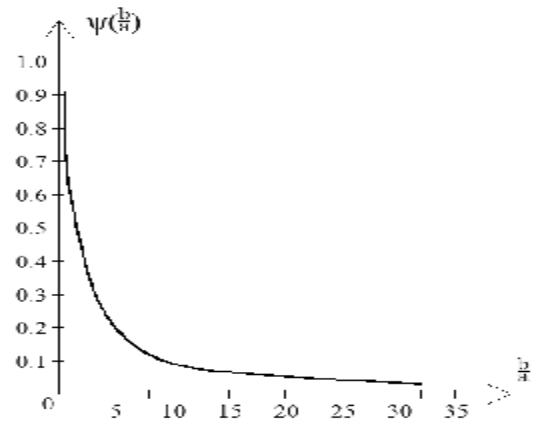


Рис. 3. График функциональной зависимости

$$\psi\left(\frac{b}{a}\right)$$

Fig. 3. Graph functional Dependency  $\psi\left(\frac{b}{a}\right)$

Следовательно, по краям пояса ригеля возникают максимальные напряжения, которые к середине значительно уменьшаются, и возникает большой перепад значений. Эпюра распределения напряжений имеет вид параболы. Это обусловлено тем, что стенка колонны ничем не подкреплена и под воздействием нагрузки прогибается, а по краям нагрузка воспринимается боковыми стенками колонны, что способствует возникновению концентрации напряжений.

С помощью выражения (4) можно определить прогиб в любой точке стенки колонны при различном значении распределенной нагрузки. Для практического использования предлагается таблица 1. Проанализировав формулу (4) получили, что эпюра распределения напряжений имеет вид параболы. Это обусловлено тем, что стенка колонны ничем не подкреплена и под воздействием нагрузки прогибается, а по краям нагрузка воспринимается боковыми стенками колонны, что способствует возникновению концентрации напряжений.

В итоге, определение максимальных нормальных напряжений в поясе ригеля предлагается выполнять с использованием следующей расчетной модели (рис. 1) [12]. Выполняем рассечение пояса ригеля со стенкой колонны по правилам моделирования пластинчатых элементов. Пояс ригеля рассматривается как плоская КЭ модель с требуемыми граничными условиями на торце: ограничение перемещений в поперечном направлении пояса и упругие связи, эмитирующие жесткость пояса ригеля и стенки колонны.

С учетом выведенных формул предлагается следующая методика определения нормальных напряжений в поясе ригеля:

- вычисление перемещений точек торца пояса ригеля по формуле (5). Полученные значения перемещений определены без учёта совместности деформаций пояса и стенки колонны;
- определение податливости стенки колонны [6, 12];
- определение суммарных перемещений;



Рис. 2. Расчетная модель

Fig. 2. The computational model

- определение усилий, приходящихся на КЭ пружины, эмитирующие собой отсеченную часть. Определение жесткости КЭ упругих связей по

$$\text{формуле } k = \frac{F}{x};$$

- статический расчет плоской КЭ модели пояса ригеля с граничными условиями, с помощью программного комплекса. По результатам расчета строится эпюра распределения напряжений по оси действия усилия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Абдурахманов А. З., Меннанов Э. М. Ажермачев Г.А., 2012: Экспериментальные исследования энергопоглотителя кольцевого типа на знакопеременные нагрузки. //MOTROL. – Vol. 14, № 1, 28–33.
2. Ажермачев Г. А., Перминов Д.А., 2008: О распределении усилий в элементах рамного узла сейсмостойкого каркаса с колоннами коробчатого сечения.// Збірник наукових праць. – Київ: Сталь, – вип. 1, 111 – 119.
3. Ажермачев Г. А., Остриков Г.М., 1972: Экспериментальное исследование узловых соединений рамных каркасов. //Изд. вузов Строительство и архитектура. – № 9.
4. Геммерлинг А. В., Трофимов В. И., Милейковский И. Е., 1955: Исследование работы рамных конструкций. //Научное сообщение. – М. : ЦНИПС. – вып. 21. – 140.
5. Килимник Л. Ш., Лаврентьева Л. Э., 1970: Работа узлов стальных каркасов зданий при статических и циклических нагрузках. //Промышленное строительство. – № 9, 28 – 32.
6. Лампси Б. Б., 1979: Металлические тонкостенные несущие конструкции при локальных нагрузках: Теория местных напряжений. – М. : Стройиздат. – 272.

7. Лебедич И.Н., 1980: Исследование рамного каркаса из унифицированных элементов с новым конструктивным решением узлов для многоэтажных зданий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. – К. – 204.
8. Морозова Е.В., 2012: Сейсмостойкость реконструируемых зданий средней этажности.// MOTROL. –Vol. 14, № 1, 48 – 54.
9. Морозова Е.В., Сергеева Р.А., 2012: Эффективные комбинированные плиты перекрытий для зданий с несущим металлическим каркасом.// MOTROL. – Vol. 14, № 6, 89 – 94.
10. Перминов Д. А., Перминова Е.Г., 2013: Исследование напряженного состояния поясов ригеля узла рамного каркаса.// Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА. – Вип. 69, 366 – 368.
11. Перминов Д. А., Перминова Е.Г., 2012: Численные исследования узлов стальных каркасов. Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. Трудов. – Дн-вск: ПГАСА. – Вип. 65, 441 – 445.
12. Святошенко А. Е., 2006: Повышение надежности рамных узлов стальных каркасов многоэтажных зданий: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01 „Строительные конструкции, здания и сооружения”. – Н. Новгород. – 25.
13. Чемодуров В.Т., Перминов Д.А., Перминова Е.Г., 2012: Определение напряжений в поясе ригеля рамного узла стального каркаса. Будівництво в сейсмічних районах України. – Київ: ДП НДІБК. – 518–524.

#### METHOD OF DETERMINING THE DISTRIBUTION OF TENSION IN THE BELTS BEAM OF MOMENT-RESISTING KNOT

**Summary.** The technique of definition of tension in a belt of a crossbar of frame knot of a steel framework with a column of box-shaped section is considered. The offered technique is based on definition of a deflection of a wall of a column by methods of the theory of elasticity and further calculations using the software package.

**Key words:** column, wall, deflection, belt, tension, rigidity.