

**Источник:** Дорофеев, В.С. Расчет простейшей пространственной железобетонной рамной конструкции при помощи численно-аналитического метода граничных элементов с учетом процессов трещинообразования / В.С. Дорофеев, А.В. Ковров, А.М. Кушнир // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 5. – С. 78-85.



**Дорофеев Виталий Степанович**, д-р техн. наук, профессор, ректор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

**Ковров Анатолий Владимирович**, канд. техн. наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

**Кушнир Алексей Михайлович**, ассистент кафедры архитектурных конструкций, реконструкции и реставрации зданий, сооружений и их комплексов, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

## **РАСЧЕТ ПРОСТЕЙШЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ**

### **ANALYSIS OF THE SIMPLIEST SPACIAL REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURE BY NUMERICALLY-ANALYTICAL METHOD OF BOUNDARY ELEMENTS WITH TAKING INTO ACCOUNT THE CRACKING PROCESSES**

#### **Аннотация**

*Приведена методика и пример расчета простейшей пространственной рамной конструкции при помощи численно-аналитического метода граничных элементов.*

#### **Abstract**

*The method and the example of analysis of the simplest spacial reinforced concrete frame structure by numerically-analytical method of boundary elements are presented.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Распределение внутренних усилий в статически неопределимых конструкциях зависит от жесткостей составляющих ее элементов.

В свою очередь в связи с трещинообразованием жесткость железобетонных элементов переменная по их длине и зависит от уровня возникающих в них внутренних усилий.

Определение напряженно-деформированного состояния железобетонных пространственных рамных конструкций основывается на модели деформирования изгибаемых железобетонных элементов с использованием деформационной теории и решается методом последовательного уточнения жесткостей [1, 2, 3].

Влиянием процессов трещинообразования на изменение продольной жесткости элементов пренебрегаем, так как образование трещин происходит не по всей длине элемента, а лишь на отдельных его участках. При этом в соответствии с выводами А.В. Геммерлинга [4] принимается, что при сравнительно небольших деформациях рамных конструкций влиянием деформаций сжатия на искривление оси можно пренебречь.

#### УЧЕТ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАМНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных пространственных рамных конструкций элементы исходной расчетной схемы разбиваются на участки с кусочно-постоянной жесткостью.

Физический закон деформирования сечений железобетонной рамы:

$$M = B\chi, \quad (1)$$

где  $M$  – изгибающий момент;

$B$  – изгибная жесткость сечения;

$\chi$  – кривизна сечения.

Для каждого участка конструкции с постоянной изгибной жесткостью в соответствии с предложениями, приведенными в [5, 6, 7], строятся диаграммы «кривизна – изгибающий момент», «угол закручивания – крутящий момент».

На первом этапе расчета изгибная и крутильная жесткость всех элементов принимается равной в упругой стадии и определяется на основе формул:

$$B_i^{(1)} = \frac{M_{cre,i}}{\chi_{cre,1,i}}; \quad B_i^{(s)T} = \frac{T_i^s(\theta_i)}{\theta_i}, \quad (2)$$

где  $M_{cr}$  – изгибающий момент трещинообразования;  
 $T_i^s$  – крутящий момент;  
 $\theta_i$  – угол закручивания.

В результате расчета заданной конструкции определяются значения изгибающих моментов, возникающих в элементах конструкции. По принятым значениям жесткостей и полученным значениям изгибающих моментов определяются значения кривизны.

$$X_i^{(s)} = \frac{M_i^{(s)}}{B_i^{(s)}}. \quad (3)$$

На последующих этапах расчета в соответствии с полученными на предыдущей итерации значениями кривизны по диаграммам «кривизна – изгибающий момент» для каждого участка уточняется значение изгибной жесткости:

$$B_i^{(s)} = \frac{M_i^{(s-1)} (X_i^{(s-1)})}{X_i^{(s-1)}}. \quad (4)$$

Проверяется условие образования нормальных трещин при достижении деформации крайнего растянутого волокна бетона предельного значения  $\varepsilon_{br} > \varepsilon_{br,cr}$ . В том случае если нормальная трещина не образуется, назначается упруго-пластичная крутильная жесткость:

$$B_i^{(s)}_T = \frac{T_i^s (\theta_i)}{\theta_i}. \quad (5)$$

При образовании нормальных трещин определяется высота бетона над трещиной.

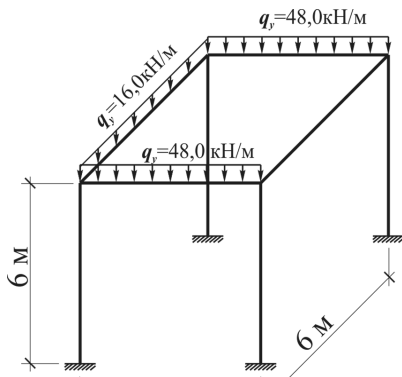
Значения изгибающих и крутящих моментов, полученные в результате расчета, сравниваются со значениями, полученными на предыдущей итерации. Расчет продолжается до тех пор, пока разница между значениями на текущей и предыдущей итерации не окажется меньше заданной величины  $\xi$ , характеризующей точность расчета:

$$\left| \frac{M^{(s)} - M^{(s-1)}}{M^{(s)}} \right| \leq \xi; \quad \left| \frac{T_i^s - T_i^{s-1}}{T_i^{s-1}} \right| \leq \xi. \quad (6)$$

В соответствии с представленным алгоритмом составлена программа для определения напряженно-деформированного состояния железобетонных пространственных рамных конструкций с произвольным количеством этажей, шагов и пролетов.

## РАСЧЕТ ОДНОЭТАЖНОЙ ОДНОПРОЛЕТНОЙ ОДНОШАГОВОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ С УЧЕТОМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрим расчет одноэтажной однопролетной одношаговой железобетонной пространственной рамной конструкции на действии вертикальной постоянной и полезной нагрузки с учетом процессов трещинообразования, расчетная схема которой представлена на рис. 1.

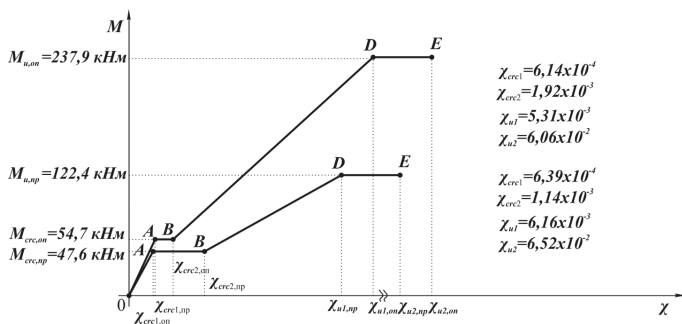


**Рисунок 1.** Расчетная схема одноэтажной однопролетной одношаговой пространственной рамной конструкции

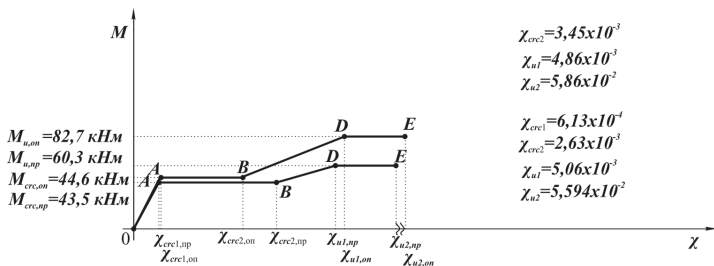
Приведенная конструкция была рассчитана в упругой стадии и с учетом трещинообразования.

По принятому армированию для опорных и пролетных сечений продольных и поперечных ригелей рамной конструкции построены линеаризованные диаграммы «изгибающий момент – кривизна», которые приведены на рис. 2 и 3.

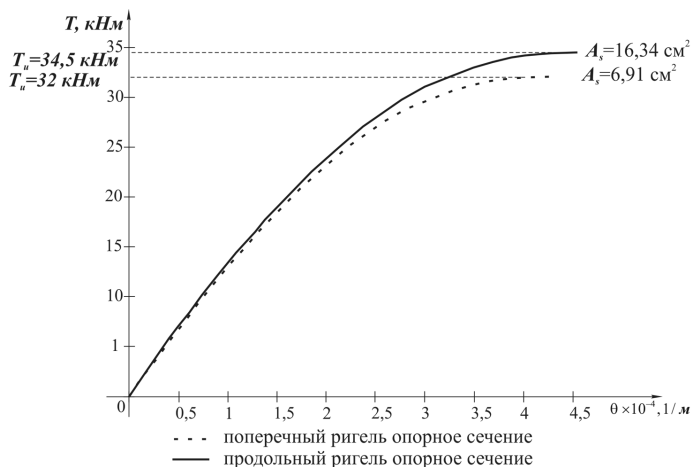
По принятому армированию продольных и поперечных ригелей рамной конструкции строятся диаграммы «крутящий момент – угол закручивания», которые приведены на рис. 4.



**Рисунок 2.** Диаграмма «изгибающий момент – кривизна» для пролетного и опорного сечений продольного ригеля



**Рисунок 3.** Диаграмма «изгибающий момент – кривизна» для пролетного и опорного сечений поперечного ригеля



**Рисунок 4.** Диаграмма «крутящий момент – угол закручивания» для опорного сечения поперечного и продольного ригелей

По определенным значениям изгибающих моментов  $M_z$ ,  $M_y$ , и крутящих моментов  $M_x$  построены эпюры, представленные на рис. 5–7.

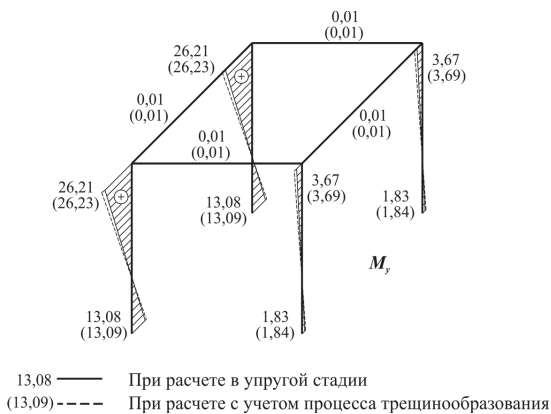
Сравнение результатов расчета в упругой стадии и с учетом трещинообразования при расчетной нагрузке представлено в табл. 1.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

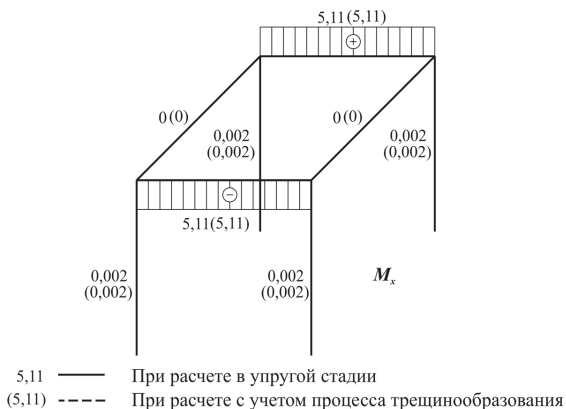
Трещинообразование в элементах одноэтажной однопролетной одношаговой железобетонной пространственной рамной конструкции при заданной нагрузке оказывает существенное влияние на перераспределение изгибающих моментов  $M_z$ , которое в стойках изменяется в пределах от 21 до 26 %.



**Рисунок 5.**  
Эпюра изгибающих моментов  $M_z$  (кНм)



**Рисунок 6.**  
Эпюра изгибающих моментов  $M_y$  (кНм)



**Рисунок 7.**  
Эпюра крутящих моментов  $M_x$  (кНм)

Таблица 1

**Сравнение значений изгибающих моментов  $M_z$  (кНм), возникающих в элементах простейшей рамной конструкции, при расчете в упругой стадии и с учетом трещинообразования**

№ элемента	№ сечений	Упругий расчет	Расчет с учетом трещинообразования	$\Delta, \%$
1	1	43,499	54,058	24
	2	-21,67	-27,007	25
	3	-86,84	-108,07	25
2	1	-43,29	-54,519	26
	2	21,882	26,546	21
	3	87,05	107,61	24
3	1	43,499	54,058	24
	2	-21,67	-27,007	25
	3	-86,84	-108,07	25
4	1	-43,29	-54,519	26
	2	21,882	26,546	21
	3	87,05	107,61	24
5	1	-86,84	-108,07	25
	2	129,06	108,16	-16
	3	-87,05	-107,61	24
6	1	-86,84	-108,07	25
	2	129,06	108,16	-16
	3	-87,05	-107,61	24
7	1	-32,12	-32,152	0,08
	2	39,875	39,848	-0,07
	3	-32,12	-32,152	0,08
8	1	2,2433	2,2302	-0,6
	2	2,2433	2,2302	-0,6
	3	2,2433	2,2302	-0,6
Примечание. Сечение 1 находится в начале элемента, 2 – в середине элемента, 3 – в конце элемента				

В продольных ригелях – до 24 %, а в пролетных ригелях – до 16 %.

Перераспределение изгибающих моментов  $M_y$  в результате трещинообразования не превышает 0,5 % в стойках и 0,04 % – продольных и поперечных ригелях.

Перераспределение крутящих моментов  $M_x$  в стойках, продольных и поперечных ригелях в результате трещинообразования не превышает 0,1 %.

#### **Список использованных источников**

1. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування: ДСТУ В.2.6-156:2011. – Офіц. вид. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 162 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуд України).
2. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6-98:2009. – Офіц. вид. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2011. – 71 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуд України).
3. Нагрузки и воздействия: ДБН В.1.2-2:2006– Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2006. – 71 с. (Нормативний документ Мінрегіонбуд України).
4. Ковтуненко, А.В. Расчет статически неопределимых железобетонных рамных конструкций с учетом трещинообразования: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Ковтуненко. – Одесса, 2012. – 162 с.
5. Геммерлинг, А.В. Расчет стержневых систем / А.В. Геммерлинг – М. : «Стройиздат», 1974. – 203 с.
6. Дорофеев, В.С. К построению линеаризированных диаграмм деформирования изгибаемых железобетонных элементов / В.С. Дорофеев, А.В. Ковров, А.В. Ковтуненко, Н.К. Высочан // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. № 22., Рівне, НУВГП, 2011. – С. 320–327.
7. Дорофеев, В.С. К построению диаграмм «крутящий момент – угол закручивания» с использованием шагово-итерационной методики для железобетонных элементов прямоугольного сечения с трещиной/ В.С. Дорофеев, А.В. Ковров, А.В. Ковтуненко, А.М. Кушнир // Проблемы теории и практики строительных конструкций. – Одесса, 2013. – С. 73–79.

*Статья поступила в редколлегию 28.11.2013*