

УДК 624.04:624.072.2.014.2

А. И. КОЛЕСОВ, канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных конструкций; А. В. ГУРИН, магистрант

## АНАЛИЗ МЕСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНКИ НА ПРИМЕРЕ КЭ-МОДЕЛИ ДВУХПРОЛЕТНОГО РИГЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ РАМЫ АНГАРА ДЛЯ ДВУХ САМОЛЕТОВ

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел. (831) 430-54-88;  
эл. почта: artemxan96@mail.ru

*Ключевые слова:* устойчивость стенок, балка переменного сечения, метод коэффициентов Новинькова, критические напряжения, местная устойчивость стенок переменного сечения.

*Приводится сравнительный анализ методик проверки местной устойчивости стенок стальных балок на конкретном примере. В сравнении участвуют: нормативная методика проверки стенок постоянного сечения и методика коэффициентов А. Г. Новинькова для стенок переменного сечения. Определены критические напряжения и произведена оценка необходимости постановки продольных ребер жесткости в отсеках.*

Исследована стальная двухпролетная рама с шарнирным опиранием неразрезного ригеля  $2 \times 45$  м переменного сечения по длине пролета на стойки постоянного сечения.

Принятые определения:

- расчетный отсек – участок стенки, расположенный между поперечными ребрами жесткости;
- условные отсеки – участки стенки, расположенные по длине расчетного отсека в его границах. Так, в расчетном отсеке 1 существуют три условных отсека.

Расчетная схема рамы с расчетными нагрузками показана на рис. 1. Снеговая нагрузка представлена в двух вариантах, постоянная – в одном. Расчет рамы выполнен от пяти комбинаций нагружений. Поперечные ребра жесткости в ригеле установлены под прогонами с шагом 3 м и над опорами кран-балок. Схема расположения расчетных отсеков ригеля (до оси симметрии) приведена на рис. 2.

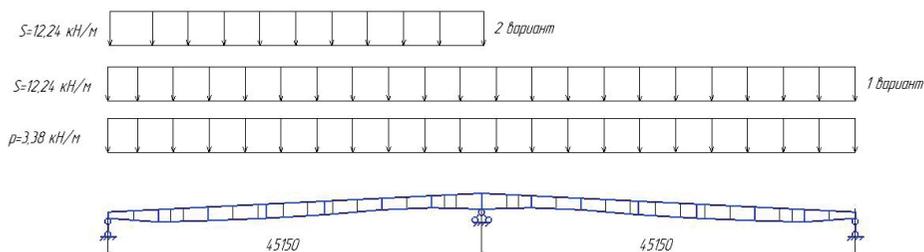


Рис. 1. Расчетная схема ригеля с расчетными нагрузками

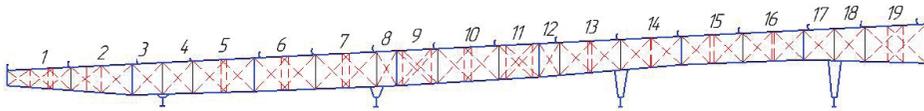


Рис. 2. Схема расположения условных отсеков ригеля (штриховая линия – границы расчетных отсеков)

Расчетные напряжения в стенке ригеля переменного сечения вычислены для модели из пластинчатых КЭ типа 44 в ППК SCAD. Общий вид отсеков стенки при проверке местной устойчивости приведен в двух вариантах: прямоугольный (рис. 3) по нормам [1] и трапецевидный для ригелей переменного сечения (рис. 4).

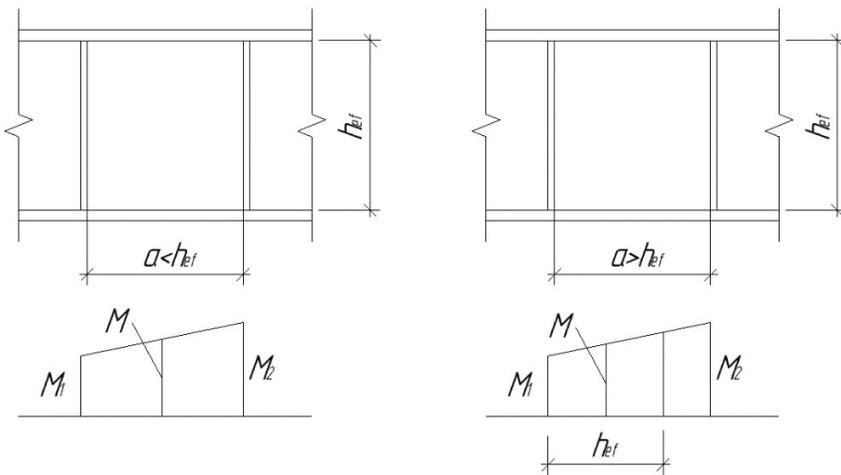


Рис. 3. Схема для расчета отсека по нормам

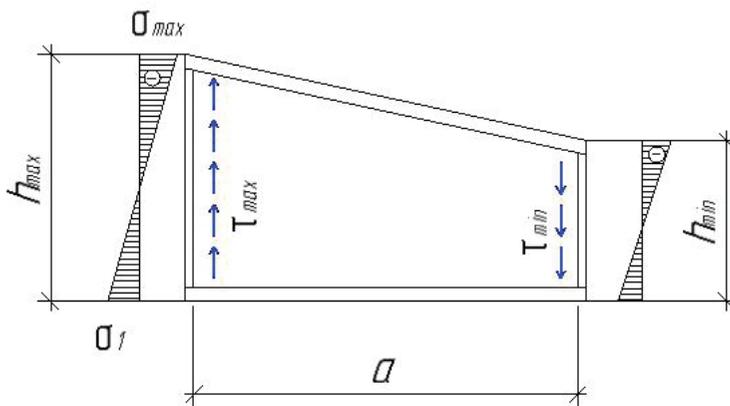


Рис. 4. Схема для расчета отсека по методике Новинькова



При длине отсека существенно большей высоты стенки ( $a \gg h_{ef}$ ) задача усложняется, так как требуется проверка устойчивости стенки в нескольких сечениях отсека. Интересным здесь является то, что расчетные сечения и расчетный момент назначаются не по максимальным значениям, а по средним в условных отсеках при  $a = h_w$ .

Анализ местной устойчивости стенки ригеля переменного сечения по длине пролета выполнен на 19 КЭ (до оси симметрии), на которые был разделен ригель, и в ПК SCAD найдены для каждого КЭ поперечные сечения, удовлетворяющие I предельному состоянию по прочности и II предельному состоянию по жесткости. Для проверки местной устойчивости по нормам [ф. 80, 1] использовалась расчетная формула следующего вида:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} + \frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2} \leq \gamma_c, \quad (1)$$

в которой слагаемое  $\frac{\sigma_{loc}}{\sigma_{loc,cr}}$  под корнем не использовалось, так как в верхней зоне ригеля под прогонами устанавливались поперечные ребра жесткости, а локальные напряжения в инженерных расчетах от сосредоточенных нагрузок не учитывались. Аналогично в нижней зоне в местах крепления опор под кран-балками ставились поперечные ребра жесткости, и слагаемое, отображающее влияние локальных напряжений на местную устойчивость, не участвует в расчете.

В формуле 1:

$\sigma = \frac{M_x^{cp}}{I_x} \cdot \frac{h}{2}$  – средние изгибные напряжения в условном отсеке ригеля ( $a = h_w$ ), вычисленные в сечении по центру длины для каждого условного отсека;

$\tau = \frac{Q}{A_w \cdot h_w}$  – среднее касательное напряжение по центру длины условного отсека;

$\sigma_{cr}, \tau_{cr}$  – соответственно их критические значения по [ф. 81, 83, 1];

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы по [табл. 1, 1].

Результаты расчетов местной устойчивости стенки в каждом из девятнадцати расчетных отсеков сведены в табл. 4 и табл. 5, в которых основные параметры обозначают следующее:

$\bar{\lambda}_w \leq 6 \sqrt{\left(\frac{R_y}{\sigma}\right)}$  – согласно требованию [п. 8.5.3, 1], относительно устойчивости

стенки. Здесь  $\sigma$  – наибольшее сжимающее изгибное напряжение в поясе в рассматриваемом условном отсеке;

$\bar{\lambda}_w \leq 5,5 \sqrt{\left(\frac{R_y}{\sigma}\right)}$  – согласно требованию [п. 8.5.11, 1], относительно постановки

продольного ребра.

Для проверок местной устойчивости стенок в ригеле переменного сечения использованы результаты исследования А. Г. Новинькова [2] в его кандидатской диссертации, изложенные в книге В. В. Катюшина [4] в виде приближенных формул по определению критических нормальных и касательных напряжений в стенке ригеля.

Формулы для определения нормальных и касательных критических напряжений даны в следующем виде [ф. 4,5, 4]:

$$\sigma_{cr} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \sigma_{cr, norm},$$

$$\tau_{cr} = k_5 \cdot k_6 \cdot \tau_{cr, norm},$$



$$\text{где: } \sigma_{\text{cr, норм}} = \frac{c_{\text{cr}} \cdot R_y}{\bar{\lambda}_{w, \text{max}}^2};$$

$$\tau_{\text{cr, норм}} = 10,3 \left( 1 + \frac{0,76}{\mu^2} \right) \frac{R_s}{\bar{\lambda}_d^2};$$

$\bar{\lambda}_{w, \text{max}} = h_{\text{max}} / t_w \sqrt{(R_y/E)}$  – наибольшая условная гибкость стенки;

$$\bar{\lambda}_d = \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{R_y}{E}};$$

$d$  – меньшая из сторон отсека стенки ( $h_{\text{max}}$  или  $a$ );

$\mu$  – отношение большей стороны отсека к меньшей.

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_5$  в книге [4] рекомендовано определять интерполяцией значений из табл. 1 (см. ниже) при отношении  $h_{\text{max}}/h_{\text{min}}$ , где  $h_{\text{max}}$  и  $h_{\text{min}}$  – наибольшая и наименьшая высота отсека стенки между поперечными ребрами жесткости соответственно.

Таблица 1

Коэффициенты  $k_1$  и  $k_5$ 

$h_{\text{max}}/h_{\text{min}}$	1,0	1,15	1,30	1,40	1,50
$k_1$	1,0	1,06	1,15	1,18	1,20
$k_5$ – сжата короткая диагональ	1,0	1,20	1,37	1,49	1,59
$k_5$ – сжата длинная диагональ	1,0	1,06	1,09	1,11	1,12

При определении коэффициента  $k_5$  по вышеуказанной таблице нужно учитывать направление касательных напряжений (рис. 5) [4].

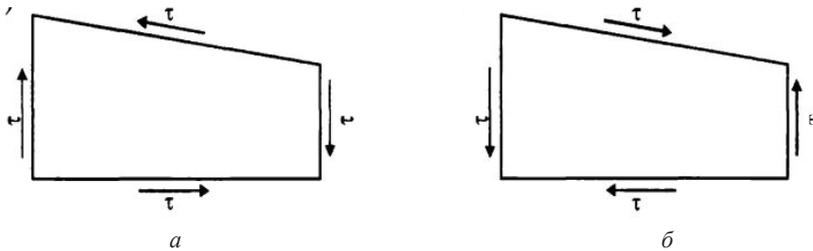


Рис. 5. Определение направления касательных:  $a$  – сжата короткая диагональ;  $b$  – сжата длинная диагональ

$$\text{Коэффициент } k_2 = f(\alpha_{\text{max}}),$$

где  $\alpha_{\text{max}} = \frac{\sigma_{\text{max}} - \sigma_1}{\sigma_{\text{max}}}$ ;  $\sigma_{\text{max}}$  – максимальное сжимающее напряжение у расчетной границы

стенки в сечении с максимальной высотой, принимаемое со знаком плюс;  $\sigma_1$  – напряжение по противоположной кромке стенки, принимаемое со своим знаком.

$$k_2 = 1/(6 - 3\alpha_{\text{max}}), \text{ при } 0 \leq \alpha_{\text{max}} \leq 0,667;$$

$$k_2 \text{ определяется по табл. 2, при } 0,667 \leq \alpha_{\text{max}} \leq 1,4;$$

$$k_2 = 0,25\alpha^2, \text{ при } 1,4 \leq \alpha_{\text{max}} \leq 4.$$

Коэффициент  $k_2$  при  $0,667 \leq \alpha_{\max} \leq 1,4$ 

$\alpha_{\max}$	0,667	0,8	1,0	1,2	1,4
$k_2$	0,25	0,275	0,325	0,395	0,49

Коэффициент  $k_3 = f(\alpha_a)$  учитывает изменение нормальных напряжений по длине отсека [3],

где  $\alpha_a = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}$ ;  $k_3 = 1,0$  при  $0 \leq \alpha_a \leq 0,05$ ;  $k_3 = 1 - 0,2 \alpha_a$  при  $\alpha_a > 0,05$ ;

$\alpha_{\max}$  и  $\alpha_{\min}$  – значения коэффициентов на краях отсека в зоне максимальной и минимальной высоты стенки.

$$k_4 = 1 + 0,3\alpha_\sigma$$

где  $\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ ,  $\sigma_{\max}$  и  $\sigma_{\min}$  – сжимающие нормальные напряжения на краях

стенки в зоне максимальной и минимальной высоты отсека.

$k_6 = 1 + 0,5\alpha_\tau$  – учитывает изменение величины касательных напряжений по длине отсека,

где  $\alpha_\tau = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{\tau_{\max}}$ ;  $\tau_{\max}$  и  $\tau_{\min}$  – касательные напряжения на краях стенки в зоне

максимальной и минимальной высоты отсека.

При одновременном действии в отсеке  $\sigma$  и  $\tau$  общая формула проверки стенки на местную устойчивость, приведенная в работе [4], имеет вид:

$$(1 + \beta_h^3) \sqrt{\frac{2 - \alpha_y}{4} \cdot k_\sigma + \left(\frac{\alpha_\sigma}{1 + \alpha_x}\right)^2} \cdot (k_\sigma \cdot k_\tau)^2 + \sqrt{\left(\frac{2 + \alpha_{\max}}{4}\right)^2 \cdot k_\sigma^2 + (k_\tau)^2} \leq \gamma_c,$$

где:

$$k_\tau = \tau / \tau_{cr};$$

$$k_\sigma = \sigma / \sigma_{cr}; \beta_h = (h_{\max} - h_{\min}) / h_{\max}; \gamma_c = 1 - \text{для рядовых отсеков};$$

$$\gamma_c = 0,9 - \text{для отсека в зоне сопряжения ригеля и стойки};$$

$$\alpha_x = \frac{\sigma_{h,\max} - \sigma_{h,\min}}{\sigma_{h,\max}}; \alpha_y = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\sigma_{\max}},$$

где  $\sigma_{h,\max}$  – максимальное сжимающее напряжение в сечении отсека с максимальной гибкостью стенки;  $\sigma_{h,\min}$  – минимальное сжимающее напряжение в сечении отсека с максимальной гибкостью стенки.

Результаты расчетов ригеля по методике А. Г. Новинькова приведены в табл. 5, 6, 7 ( $t_{f1}$  и  $b_{f1}$  – толщина и ширина верхнего пояса,  $t_{f2}$  и  $b_{f2}$  – толщина и ширина нижнего пояса,  $h_w$  и  $t_w$  – высота и толщина стенки,  $\sigma_v$  и  $\sigma_n$  – нормальные напряжения в верхнем и нижнем поясе). Сравнительный анализ результатов по обеим методикам сведен в табл. 3.



Таблица 3

**Сравнительный анализ методик («+» – отсек теряет устойчивость,  
«-» – отсек не теряет устойчивость)**

Методика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Нормы	-	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-
Новиньков	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-

Таблица 4

**Проверка устойчивости стенок отсеков по нормам**

Номер отсека	$h$	$t_{f1}$	$t_{f2}$	$b_{f1}$	$b_{f2}$	$h_w$	$t_w$	$\sigma_B$	$\sigma_H$	$\sigma_{cr}$	$\tau$	$\tau_{cr}$	Проверка устойчивости
1	87,0	1,4	1,4	24	23,93	84,2	0,85	-4,7	5,2	46,8	4,4	17,0	0,3
1	100,8	1,4	1,4	28	27,85	98	0,85	-12,7	12,8	48,9	3,9	17,1	0,3
1	112,3	1,4	1,4	31,1	31,01	109,5	0,85	-15,8	16,1	39,1	3,2	14,0	0,5
2	112,3	1,4	1,4	31,1	31,01	109,5	0,85	-16,9	17,1	39,1	2,3	14,1	0,5
2	150,0	1,4	1,4	42	41,5	147,2	0,85	-16,9	17,0	21,7	1,8	8,4	0,8
3	153,3	1,5	1,5	42,63	41,88	150,25	0,9	-16,9	16,8	23,4	2,0	13,4	0,7
4	156,5	1,5	1,5	43,25	43	153,5	0,9	-18,7	18,7	22,4	1,7	13,2	0,9
5	156,5	1,5	1,5	43,25	43	153,5	0,9	-19,9	19,9	22,4	1,5	8,8	0,9
5	163,0	1,5	1,5	44,5	44,5	160	0,9	-20,7	20,6	20,6	1,4	8,2	1,0
6	163,0	1,65	1,6	44,5	44,5	159,75	0,95	-19,8	20,1	23,2	1,5	9,1	0,7
6	166,0	1,65	1,6	46	46	162,75	0,95	-20,3	20,6	22,3	1,4	8,9	0,9
7	166,0	1,65	1,6	46	46	162,75	0,95	-20,9	21,0	22,3	1,1	8,9	0,9
7	169,0	1,65	1,6	47,5	47,5	165,75	0,95	-21,5	21,3	21,6	0,8	8,6	1,0
8	170,0	1,65	1,6	48	48	166,75	0,95	-22,8	22,7	21,3	1,4	24,4	1,1
9	170,0	1,6	1,6	48	48	166,8	0,95	-20,7	20,8	21,2	1,0	10,5	1,0
9	168,0	1,6	1,6	47,14	47,14	164,8	0,95	-21,4	21,2	21,7	1,0	10,7	1,0
10	168,0	1,6	1,6	47,14	47,14	164,8	0,95	-20,7	21,1	21,7	1,3	8,7	1,0
10	165,0	1,6	1,6	45,86	45,86	161,8	0,95	-20,9	20,7	22,5	1,4	8,9	0,9
11	165,0	1,6	1,6	45,86	45,86	161,8	0,95	-19,8	20,2	22,5	1,6	11,0	0,9
11	163,0	1,6	1,6	45	45	159,8	0,95	-19,7	19,7	23,0	1,7	11,1	0,9
12	163,0	1,55	1,55	45	45	159,9	0,9	-20,0	20,9	20,7	2,2	22,3	1,0
13	159,4	1,55	1,55	43	43	156,33	0,9	-20,1	20,4	21,7	2,3	8,5	1,0
13	148,7	1,55	1,55	37	37	145,61	0,9	-20,0	19,9	24,8	2,3	9,6	0,8
14	148,7	1,55	1,55	37	37	145,61	0,9	-18,9	19,1	24,8	2,8	9,6	0,8
14	138,0	1,55	1,55	31	31	134,9	0,9	-17,0	17,3	28,5	2,8	10,9	0,5
15	138,0	1,4	1,4	31	31	135,2	0,8	16,5	-16,4	22,6	1,8	8,6	0,8
15	141,0	1,4	1,4	36	36	138,2	0,8	17,9	-17,8	21,9	1,8	8,3	0,9



Окончание табл. 4

16	141,0	1,4	1,4	36	36	138,2	0,8	19,1	-19,0	21,9	2,0	8,3	0,9
16	144,0	1,4	1,4	41	41	141,2	0,8	20,3	-20,3	21,1	1,8	8,0	1,0
17	155,5	1,8	1,85	44,25	43,88	151,85	1,1	16,6	-16,3	34,3	2,5	19,9	0,5
18	167,0	1,8	1,85	47,5	46,75	163,35	1,1	18,2	-18,0	29,6	2,2	18,7	0,6
19	167,0	1,8	1,85	47,5	46,75	163,35	1,1	19,7	-19,5	29,6	2,3	11,8	0,7
19	190,0	1,8	1,85	54	52,5	186,35	1,1	20,5	-20,2	22,7	2,0	9,6	0,9

Таблица 5

**Входные параметры для проверки методом Новинькова**

Номер отсека	$\sigma_{cr,ном}$	$\tau_{cr,ном}$	$h_{max}$	$h_{min}$	$k_1$	$k_5$	$k_2$		$k_3$		$k_4$		$k_6$	
							$h_{max}/h_{min}$	диагональ	$\sigma_{max}$	$\sigma_1$	$\sigma_{max}$	$\sigma_1$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$
1	46,8	17,0	87	79	1,1	к	-9,4	9,5	-1,8	0,3	9,4	1,8	4,4	5,9
1	48,9	17,1	101,6	87	1,2	к	-14,2	14,3	-9,4	9,5	14,2	9,4	3,3	4,4
1	39,1	14,0	112,3	98,9	1,1	к	-17,5	17,1	-13,5	13,6	17,5	13,5	2,5	3,5
2	39,1	14,1	131,4	112,3	1,2	к	-16,4	16,9	-17,5	17,1	16,4	17,5	2,1	2,5
2	21,7	8,4	150	131,4	1,1	к	-16,7	16,2	-16,4	16,9	16,7	16,4	2,2	2,1
3	28,9	13,4	153,25	150	1,0	д	-18,0	18,6	-16,7	16,2	18,0	16,7	1,8	2,2
4	22,4	13,2	156,5	153,25	1,0	д	-20,0	19,5	-18,0	18,6	20,0	18,0	1,6	1,8
5	22,4	8,8	160	156,5	1,0	д	-20,3	20,3	-20,0	19,5	20,3	20,0	1,5	1,6
5	20,6	8,2	163	159,5	1,0	д	-20,6	21,0	-19,9	19,9	20,6	19,9	2,1	1,6
6	56,3	9,1	164,7	163	1,0	д	-20,1	20,4	-20,6	21,0	20,1	20,6	1,4	2,1
6	22,3	8,9	166	164,3	1,0	д	-20,9	21,2	-19,9	20,3	20,9	19,9	1,1	1,4
7	22,3	8,9	167,7	166	1,0	д	-20,6	21,0	-20,9	21,2	20,6	20,9	1,0	1,1
7	21,6	8,6	169	167,3	1,0	д	-26,5	22,4	-20,6	21,0	26,5	20,6	1,5	1,1
8	21,3	24,4	170	169	1,0	к	-21,3	21,1	-26,5	22,4	21,3	26,5	0,9	1,5
9	21,2	10,5	170	168,3	1,0	к	-21,3	21,1	-21,2	20,9	21,3	21,2	0,9	1,9
9	21,7	10,7	169,7	168	1,0	к	-20,4	20,1	-24,2	21,8	20,4	24,2	1,6	1,0
10	21,7	8,7	168	166,3	1,0	к	-24,2	21,8	-20,6	20,6	24,2	20,6	1,0	1,4
10	22,5	8,9	166,7	165	1,0	к	-20,6	20,6	-22,6	20,3	20,6	22,6	1,4	1,1
11	22,5	11,0	165	163,4	1,0	к	-22,6	20,3	-19,2	19,1	22,6	19,2	1,1	1,6
11	23,0	11,1	164,7	163	1,0	к	-20,1	20,7	-20,5	19,8	20,1	20,5	1,9	1,7
12	20,7	22,3	163	159,4	1,0	к	-20,5	19,8	-21,7	19,9	20,5	21,7	1,7	1,8
13	21,7	8,5	159,4	153,7	1,0	к	-21,7	19,9	-20,1	20,0	21,7	20,1	1,8	2,3
13	24,8	9,6	154,4	148,7	1,0	к	-19,6	19,5	-20,9	20,0	19,6	20,9	2,3	2,5
14	24,8	9,6	148,7	143,4	1,0	к	-20,9	20,0	-18,0	18,9	20,9	18,0	2,5	2,8
14	77,7	10,9	143,3	138	1,0	к	-18,1	18,0	-17,1	17,3	18,1	17,1	2,8	3,1
15	22,6	8,6	139,4	138	1,0	к	-11,4	11,4	-17,1	17,3	11,4	17,1	3,5	3,1
15	21,9	8,3	141	139,6	1,0	к	-18,6	18,4	-17,2	17,2	18,6	17,2	1,9	1,8
16	21,9	8,3	142,4	141	1,0	к	-19,6	19,5	-18,6	18,4	19,6	18,6	2,0	1,9
16	21,1	8,0	144	142,6	1,0	к	-19,0	18,2	-19,7	19,6	19,0	19,7	3,2	2,0



Окончание табл. 5

17	42,1	19,9	155,5	144	1,1	к	-17,3	17,5	-19,0	18,2	17,3	19,0	2,3	3,2
18	29,6	18,7	167	155,5	1,1	к	-18,9	18,6	-17,3	17,5	18,9	17,3	2,2	2,3
19	29,6	11,8	181,6	167	1,1	к	-20,1	20,2	-18,9	18,6	20,1	18,9	2,1	2,2
19	44,9	9,6	190	175,4	1,1	к	-22,7	20,6	-19,5	19,7	22,7	19,5	3,5	2,3

Таблица 6

## Вычисление критических напряжений для метода Новинькова

Номер отсека	$k_1$	$k_5$	$\alpha_{\max}$	$k_2$	$\alpha_{\min}$	$\alpha_a$	$k_3$	$\alpha_\sigma$	$k_4$	$\alpha_\tau$	$k_6$	$\sigma_{cr}$	$\tau_{cr}$
1	1,1	1,1	2,0	1,0	1,2	0,4	0,9	0,8	1,2	-0,3	0,8	57,0	16,2
1	1,1	1,2	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,3	1,1	-0,3	0,8	59,2	17,4
1	1,1	1,2	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,2	1,1	-0,4	0,8	44,1	13,0
2	1,1	1,2	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	-0,1	1,0	-0,2	0,9	43,4	15,4
2	1,1	1,2	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,1	1,0	22,9	10,3
3	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,2	0,9	31,0	12,1
4	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,2	0,9	22,8	12,2
5	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	-0,1	1,0	22,8	8,5
5	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,2	1,1	21,4	9,1
6	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	-0,5	0,8	57,3	6,9
6	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,3	0,9	23,1	7,7
7	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	-0,1	1,0	22,8	8,5
7	1,0	1,0	1,9	0,9	2,0	-0,1	1,0	0,2	1,1	0,3	1,1	19,7	9,9
8	1,0	1,0	2,0	1,0	1,9	0,1	1,0	-0,2	0,9	-0,8	0,6	19,4	15,3
9	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	-1,2	0,4	21,1	4,4
9	1,0	1,0	2,0	1,0	1,9	0,0	1,0	-0,2	0,9	0,4	1,2	20,3	13,0
10	1,0	1,0	1,9	0,9	2,0	-0,1	1,0	0,2	1,1	-0,5	0,8	20,5	6,8
10	1,0	1,0	2,0	1,0	1,9	0,1	1,0	-0,1	1,0	0,2	1,1	21,7	9,8
11	1,0	1,0	1,9	0,9	2,0	-0,1	1,0	0,2	1,1	-0,4	0,8	21,3	9,0
11	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,1	1,0	23,7	11,7
12	1,0	1,0	2,0	1,0	1,9	0,0	1,0	-0,1	1,0	-0,1	1,0	20,0	22,2
13	1,0	1,1	1,9	0,9	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,3	0,9	20,8	7,8
13	1,0	1,1	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	-0,1	1,0	-0,1	1,0	24,8	9,5
14	1,0	1,1	2,0	1,0	2,1	-0,1	1,0	0,1	1,0	-0,1	1,0	25,3	9,6
14	1,0	1,1	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,1	0,9	80,4	10,8
15	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	-0,5	0,9	0,1	1,1	19,4	9,2
15	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	0,0	1,0	22,3	8,5
16	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	0,1	1,0	22,3	8,6
16	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,0	1,0	0,4	1,2	19,9	9,6
17	1,1	1,1	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	-0,1	1,0	-0,4	0,8	42,8	17,5
18	1,0	1,1	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	0,0	1,0	31,1	20,5
19	1,1	1,1	2,0	1,0	2,0	0,0	1,0	0,1	1,0	-0,1	1,0	31,9	12,8
19	1,1	1,1	1,9	0,9	2,0	-0,1	1,0	0,1	1,0	0,4	1,2	44,1	12,5



Таблица 7

## Проверка устойчивости стенки методом Новицкого

Номер отсека	$k_{\tau}$	$k_{\sigma}$	$\tau$	$\sigma$	$\beta_h$	$\gamma_c$	$\sigma_{h,max}$	$\sigma_{h,min}$	$\alpha_x$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\alpha_y$	Проверка устойчивости
1	0,3	0,2	4,4	9,4	0,1	0,9	-9,4	9,5	0,8	-9,4	-1,8	2,0	0,6
1	0,2	0,2	3,3	14,2	0,1	0,9	-14,2	14,3	0,3	-14,2	-9,4	2,0	0,6
1	0,2	0,4	2,5	17,5	0,1	0,9	-17,5	17,1	0,2	-17,5	-13,5	2,0	0,7
2	0,1	0,4	2,1	16,4	0,2	1,0	-16,4	16,9	-0,1	-16,4	-17,5	2,0	0,6
2	0,2	0,7	2,2	16,7	0,1	1,0	-16,7	16,2	0,0	-16,7	-16,4	2,0	0,9
3	0,2	0,6	1,8	18,0	0,0	1,0	-18,0	18,6	0,1	-18,0	-16,7	2,0	0,8
4	0,1	0,9	1,6	20,0	0,0	1,0	-20,0	19,5	0,1	-20,0	-18,0	2,0	0,9
5	0,2	0,9	1,5	20,3	0,0	1,0	-20,3	20,3	0,0	-20,3	-20,0	2,0	1,0
5	0,2	1,0	2,1	20,6	0,0	1,0	-20,6	21,0	0,0	-20,6	-19,9	2,0	1,0
6	0,2	0,4	1,4	20,1	0,0	1,0	-20,1	20,4	0,0	-20,1	-20,6	2,0	0,6
6	0,1	0,9	1,1	20,9	0,0	1,0	-20,9	21,2	0,1	-20,9	-19,9	2,0	1,0
7	0,1	0,9	1,0	20,6	0,0	1,0	-20,6	21,0	0,0	-20,6	-20,9	2,0	1,0
7	0,2	1,3	1,5	26,5	0,0	1,0	-26,5	22,4	0,2	-26,5	-20,6	1,9	1,2
8	0,1	1,1	0,9	21,3	0,0	1,0	-21,3	21,1	-0,2	-21,3	-26,5	2,0	1,1
9	0,2	1,0	0,9	21,3	0,0	1,0	-21,3	21,1	0,0	-21,3	-21,2	2,0	1,0
9	0,1	1,0	1,6	20,4	0,0	1,0	-20,4	20,1	-0,2	-20,4	-24,2	2,0	1,0
10	0,1	1,2	1,0	24,2	0,0	1,0	-24,2	21,8	0,2	-24,2	-20,6	1,9	1,1
10	0,1	1,0	1,4	20,6	0,0	1,0	-20,6	20,6	-0,1	-20,6	-22,6	2,0	1,0
11	0,1	1,1	1,1	22,6	0,0	1,0	-22,6	20,3	0,2	-22,6	-19,2	1,9	1,0
11	0,2	0,9	1,9	20,1	0,0	1,0	-20,1	20,7	0,0	-20,1	-20,5	2,0	0,9
12	0,1	1,0	1,7	20,5	0,0	1,0	-20,5	19,8	-0,1	-20,5	-21,7	2,0	1,0
13	0,2	1,1	1,8	21,7	0,0	1,0	-21,7	19,9	0,1	-21,7	-20,1	1,9	1,0
13	0,2	0,8	2,3	19,6	0,0	1,0	-19,6	19,5	-0,1	-19,6	-20,9	2,0	0,9
14	0,3	0,8	2,5	20,9	0,0	1,0	-20,9	20,0	0,1	-20,9	-18,0	2,0	0,9
14	0,3	0,2	2,8	18,1	0,0	1,0	-18,1	18,0	0,1	-18,1	-17,1	2,0	0,6
15	0,4	0,6	3,5	11,4	0,0	1,0	-11,4	11,4	-0,5	-11,4	-17,1	2,0	0,9
15	0,2	0,8	1,9	18,6	0,0	1,0	-18,6	18,4	0,1	-18,6	-17,2	2,0	0,9
16	0,2	0,9	2,0	19,6	0,0	1,0	-19,6	19,5	0,1	-19,6	-18,6	2,0	1,0
16	0,3	1,0	3,2	19,0	0,0	1,0	-19,0	18,2	0,0	-19,0	-19,7	2,0	1,0
17	0,1	0,4	2,3	17,3	0,1	1,0	-17,3	17,5	-0,1	-17,3	-19,0	2,0	0,7
18	0,1	0,6	2,2	18,9	0,1	1,0	-18,9	18,6	0,1	-18,9	-17,3	2,0	0,8
19	0,2	0,6	2,1	20,1	0,1	0,9	-20,1	20,2	0,1	-20,1	-18,9	2,0	0,9
19	0,3	0,5	3,5	22,7	0,1	0,9	-22,7	20,6	0,1	-22,7	-19,5	1,9	0,9

Таким образом, метод коэффициентов дает результаты, отличающиеся в большую и в меньшую сторону от результатов расчета по нормативной методике, но в



большинстве отсеков совпадающие. В случае проведения обширного экспериментального исследования и точного подтверждения зависимостей метод может быть внесен в нормы и применен на практике. Метод легко реализуется в табличной форме, прост в освоении для инженера и не требует больших затрат времени на вычисления. Данную методику можно использовать на этапе сравнения вариантов конструкций в дополнение к нормативной.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 16.13330 – 2017. Стальные конструкции : свод правил : издание официальное : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 года № 126/пр : актуализированная редакция СНиП II-23-81\* : дата введения 2017-08-28 : [редакция от 4 декабря 2019 года]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_278905/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278905/) (дата обращения : 15.03.2021). – Режим доступа : Консультант-Плюс. Законодательство. ВерсияПроф. – Текст : электронный.

2. Новиньков, А. Г. Устойчивость стенок в элементах рамных конструкций с переменной высотой стенки : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Г. Новиньков ; НИСИ им. В. В. Куйбышева. – Новосибирск, 1991. – 176 с. – Текст : непосредственный.

3. Бирюлев, В. В. Инженерный метод расчета устойчивости стенок сжато-изгибаемых двутавров переменной высоты / В. В. Бирюлев, А. Г. Новиньков. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура. – 1991. – № 7. – С. 9–14.

4. Катюшин, В. В. Здания с каркасами из стальных рам переменной сечения (расчет, проектирование, строительство) / В. В. Катюшин. – Москва : Стройиздат, 2005. – 656 с. – ISBN 5-274-02030-5. – Текст : непосредственный.

**KOLESOV Aleksandr Ivanovich, candidate of technical sciences, professor, holder of the chair of building constructions; GURIN Artyom Vitalevich, undergraduate student**

#### WALL LOCAL BUCKLING ANALYSIS OF FE-MODEL OF TWO-SPAN VARIABLE CROSS SECTION BEAM OF TWO AIRPLANES HANGAR TRANSVERSE FRAME

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering  
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603950, Russia. Tel.: +7 (831) 432-05-76;  
e-mail: artemxan96@mail.ru

*Key words:* walls buckling, beam with variable cross section, A. G. Novinkov coefficients method, critical stress, local buckling of variable cross section walls.

---

*The article considers comparative analysis of checking methods of local wall stability of steel beams on specific sample. Compared methods: normative method of constant-cut walls stability check and A. G. Novinkov coefficients method of various height walls stability check. Critical stress was determined and assessment of the necessity to install longitudinal stiffeners in compartments was carried out.*

---

#### REFERENCES

1. SP 16.13330.2017. Stalnye konstruksii [Steel constructions] : svod pravil : izdanie ofitsialnoe : utverzhd. i vved. v deystvie prikazom Min-va stroit. i zhilischno-kommun. kozyaystva



Ross. Fed. ot 27 fevralya 2017 goda № 126/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIp II-23-81\*: data vved. 2017-08-28 : [redaktsiya ot 4 dekabrya 2019 goda]. – URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_278905/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_278905/) (data obrascheniya : 15.03.2021). – Rezhim dostupa : Konsultant-Plyus. Zakonodatelstvo. VersiyaProf.

2. Novinkov A. G. Ustoychivost stenok v elementakh ramnykh konstruksiy s peremennoy vysotoy stinki [Wall buckling in elements of frames with changing wall height]. Dissertation for the candidate of technical sciences. NISI im. V.V. Kuybysheva, Novosibirsk, 1991. – 176 p.

3. Biryulev V. V., Novinkov A. G. Inzhenerniy metod raschyota ustoychivosti stenok szhatykh dvutavrov peremennoy vysoty [Engineering method for calculating the stability of walls of compressed-bent I-beams with variable height]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo i arkhitektura [News of High Educational Institutions. Construction and architecture]. 1991; № 7. – P. 9–14.

4. Katushin V. V. Zdaniya s karkasami iz stalnykh ram peremennogo secheniya (raschyot, proektirovanie, stroitelstvo) [Buildings with variable stiffness still frame carcass (calculations, design, building)]. – Moscow: Stroyizdat, 2005. – 656 p. – ISBN 5-274-02030-5.

© А. И. Колесов, А. В. Гурин, 2022

Получено: 08.12.2021 г.

УДК 69.04:693.2

**С. Ю. ЛИХАЧЕВА**, канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; **М. Л. ПОЗДЕЕВ**, студент

### **КРИТЕРИЙ ПРОЧНОСТИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ДЕЙСТВИИ КАСАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»  
Россия, 603950, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96;  
эл. почта: lihsvetlana@yandex.ru, maksim.leon.pz@yandex.ru

*Ключевые слова:* каменная кладка, плоское напряженное состояние, касательные напряжения, критерий прочности, фигура прочности, ортотропный материал.

---

*Описан критерий прочности каменных кладок в области среза по перевязанному и неперевязанному сечению. Проведено обобщение подходов к описанию прочности кладки на действие касательных напряжений по результатам опытных данных и предложенных авторских и нормативных методик. Проведен анализ их применимости в инженерной практике.*

---

Современная нормативная база в области проектирования каменных конструкций [1] во многом консервативна и ориентирована на ручные расчеты по упрощенным одноосным расчетным моделям, которые не могут корректно описать фактическое напряженно-деформированное состояние (НДС) кладки, в том числе плоское НДС кирпичных стен при сложных видах нагружений (опирание плит перекрытий одновременно на продольные и поперечные стены, горизонтальные ветровые и сейсмические нагрузки, стены на упругом основании и др.).

Проектирование каменных зданий в инженерной практике производят, используя метод конечных элементов (МКЭ), при этом размер конечного элемента (КЭ) во много раз превосходит размер однородного вещества – кирпича и рас-