

УДК 69.04:69.07

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ РАСЧЕТНОЙ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА СТАЛЬНЫХ РАМ СО СТОЙКАМИ И РИГЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ**

***Викторов Валерий Васильевич,***

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

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции».*

***Викторова Ольга Леонидовна,***

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

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и архитектура».*

***Горохова Анастасия Алексеевна,***

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

*студент.*

### **Аннотация**

Произведен анализ напряженно-деформированного состояния в различных конечноэлементных моделях стальных рам со стойками и ригелями переменного сечения. Выполнено сравнение результатов расчета конечноэлементных моделей с результатами аналитического расчета. Сделаны выводы о наиболее предпочтительном способе моделирования таких рам, имеющем напряженно-деформированное состояние наиболее приближенное к аналитическому расчету.

**Ключевые слова:** стальные рамы с элементами переменного сечения, конечно-элементные модели, статический расчет, напряженно-деформированное состояние, оптимальные расчетные модели.

# SELECTION OF THE OPTIMAL COMPUTATIONAL FINITE ELEMENT MODEL FOR THE CALCULATION OF STEEL FRAMES WITH RACKS AND CROSSBARS OF VARIABLE CROSS SECTION

*Viktorov Valery Vasilyevich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Building Structures”.*

*Viktorova Olga Leonidovna,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Urban Construction and Architecture”.*

*Gorokhova Anastasia Alekseevna,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*student.*

## **Abstract**

The stress-strain state is analyzed in various finite element models of steel frames with racks and crossbars of variable cross section. The calculation results of finite element models are compared with the results of analytical calculation. Conclusions are drawn about the most preferable method of modeling such frames, which has a stress-strain state closest to analytical calculation.

**Keywords:** steel frames with elements of variable cross-section, finite element models, static calculation, stress-strain state, optimal calculation models.

В настоящее время проектирование зданий и сооружений выполняется на компьютерах с использованием специализированных компьютерных программ. Для исполнения требований надежности [1] и принятия безопасных проектных решений необходимо выполнять расчеты, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам [2]. При расчете прочности, устойчивости жесткости несущих конструкций в большинстве случаев используют такие специализированные расчетные программы, как СКАД,

STARK, Лира и др. Эти программы сертифицированы для применения в РФ. Они используют метод конечных элементов и позволяют выполнять статические и конструктивные расчеты железобетонных и стальных конструкций. Расчетные модели для расчета конструкций могут создаваться как в плоской, так и в пространственной постановке. Для создания расчетных моделей могут быть использованы стержневые, пластинчатые, объемные и специальные конечные элементы. Для моделирования колонн и балок как правило используют стержневые конечные элементы, для моделирования стен и плит перекрытий – плоские конечные элементы. Объемные элементы используются реже, как правило для моделирования работы основания. Специальные конечные элементы обычно используются для моделирования каких-то нестандартных ситуаций.

Разработку расчетных моделей одноэтажных производственных зданий, как правило выполняют с использованием стержневых конечных элементов, моделирующих работу колонн, балок, ферм. При использовании конструктивных элементов постоянного сечения каких-то серьезных проблем при этом не возникает. Однако в зданиях, имеющих большие пролеты, 36 м и выше, в качестве основных несущих конструкций, как правило используются рамы с элементами переменного по высоте сечения. Вопросы и проблемы проектирования таких зданий достаточно подробно рассмотрены в книге Катюшина В.В. [4].

При попытке моделирования стальных рам переменного сечения при помощи перечисленных выше расчетных программ возникает проблема, поскольку стержневых конечных элементов переменного сечения для моделирования стальных конструкций в арсенале этих расчетных программ нет.

Справедливости ради стоит отметить, что последние версии программы SCAD получили в распоряжение стержневой конечный элемент переменного сечения, однако этот элемент относится к категории параметрических сечений и не может быть использован для расчета непосредственного расчета стальных

конструкций в соответствии с [3] встроенными штатными средствами самой расчетной программы.

При необходимости моделирования стальных рам с элементами переменного сечения проектировщики, как правило, пользуются приближенным моделированием. При этом конечный стержневой элемент переменного сечения, имеющего на боковом виде форму трапеции, заменяется несколькими конечными элементами постоянного сечения, имеющими на боковом виде форму прямоугольника. Высота этих элементов постоянного сечения изменяется в соответствии с изменением высоты элемента переменного сечения.

При назначении габаритов поперечного сечения конечных элементов постоянной высоты возникает вопрос: какой размер от конечного элемента переменной высоты следует использовать.

Логичными в данной ситуации выглядят три варианта – высота конечного элемента постоянного сечения может быть принята равной максимальной, минимальной или средней высоте элемента переменного сечения. Какой из этих вариантов покажет более точные результаты – вопрос остается открытым.

Кроме этого, при создании расчетной модели возможны варианты с сопряжением конечных элементов вдоль осевой линии и ломаным очертанием верхней грани конструкции, либо со смещением осевой линии (за счет использования жестких вставок) и гладким очертанием верхней грани конструкции.

Для ответа на этот вопрос в расчетной программе SCAD было разработано несколько расчетных моделей. За основу была принята поперечная рама крытого катка в городе Пензе. Пролет рамы 48,0 метров, высота от уровня базы до уровня верха стойки – 9,60 метров, уклон ската кровли 10%. Сечение рамы двутавровое. Высота сечения на опоре – 0,60 м, высота сечения в уровне стыка ригеля и стойки – 1,80 м, высота сечения в уровне конька – 1,00 м. Рама двухшарнирная с жестким узлом сопряжения ригелей в уровне конька и шарнирным опиранием на опорах.

В программе SCAD были разработаны следующие модели:

- модель №1 с использованием конечных элементов переменного сечения;
- модель №2 и №5 с использованием конечных элементов постоянного сечения высотой равной максимальной высоте конечных элементов переменного сечения,
- модель №3 и №6 с использованием конечных элементов постоянного сечения высотой равной средней высоте конечных элементов переменного сечения;
- модель №4 и №7 с использованием конечных элементов постоянного сечения высотой равной минимальной высоте конечных элементов переменного сечения.

В модели №1 жесткость конечных элементов была задана параметрическим способом (иного не предусмотрено), в остальных моделях жесткость их задавалась жесткостью сварных сечений, чтобы иметь возможность оценки несущей способности сечений штатными средствами программы SCAD.

В моделях №2, №3 и №4 сопряжение конечных элементов осуществлялось по их срединной оси со ступенчатым верхним поясом. В моделях №5, №6 и №7 сопряжение конечных элементов осуществлялось со смещением их срединной оси и гладким верхним поясом.

И ригель, и стойки по длине были разбиты на 8 конечных элементов.

Нагрузка была принята равномерной и прикладывалась по всей длине ригеля.

Общий вид расчетных моделей приведен на рисунках 1-3.

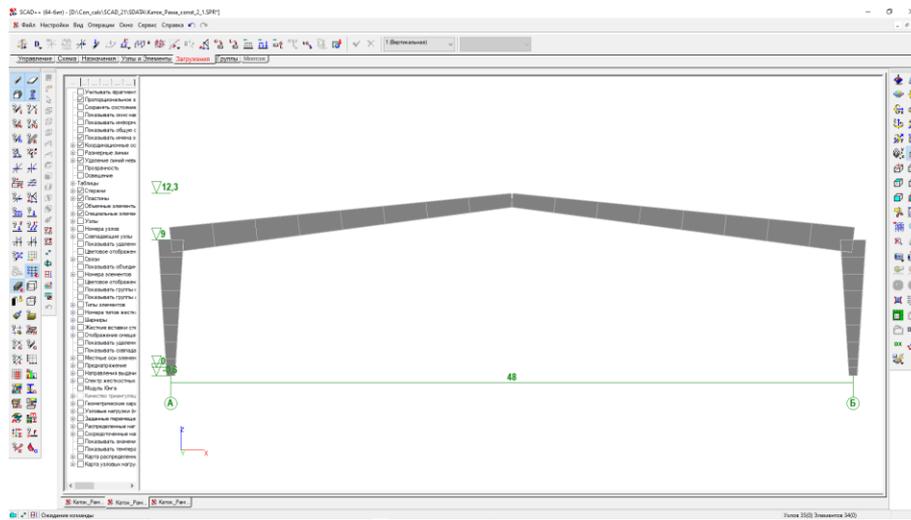


Рисунок 1 – Расчетная модель с конечными элементами переменного сечения

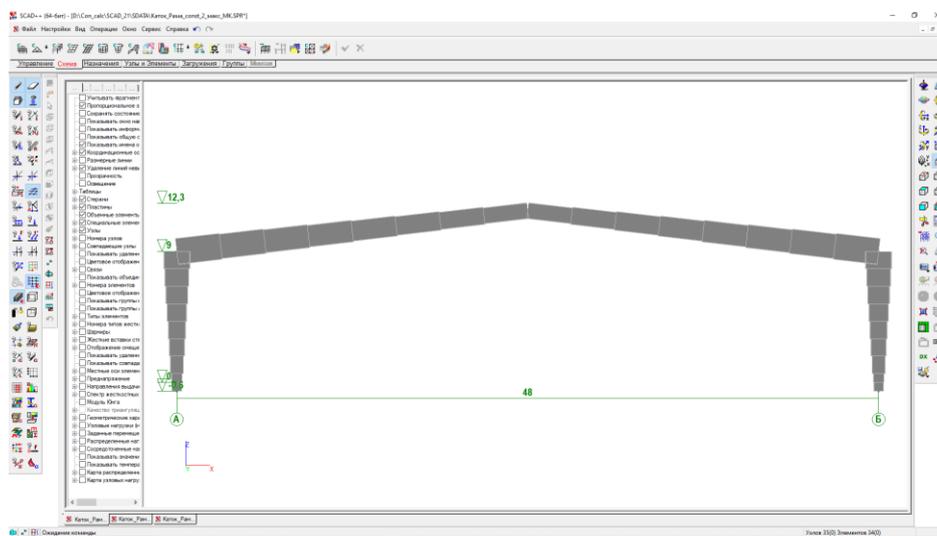


Рисунок 2 – Расчетная модель с конечными элементами постоянного сечения и совмещением их вдоль осевой линии

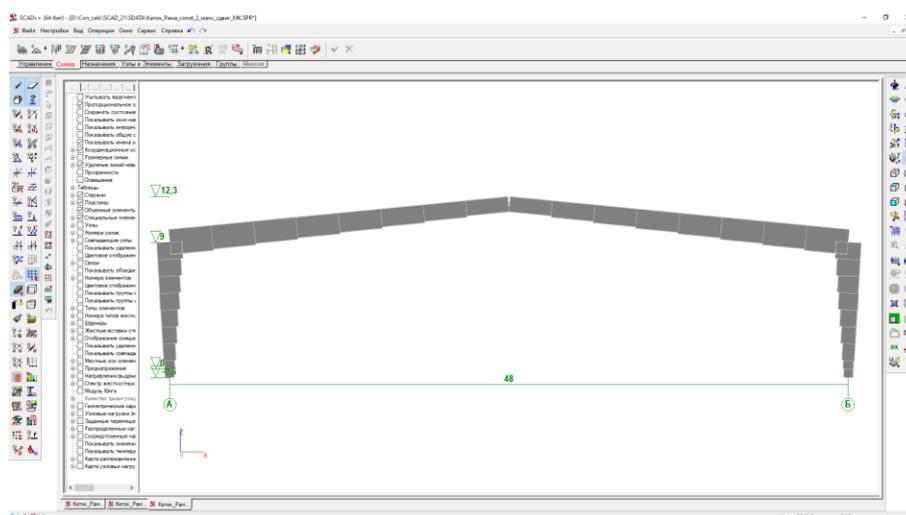


Рисунок 3 – Расчетная модель с конечными элементами постоянного сечения и совмещением их вдоль наружной грани

Для контроля полученных значений внутренних усилий был произведен ручной расчет усилий в элементах рамы. Расчет был произведен с использованием электронных таблиц Excel.

В результате расчета получены значения внутренних усилий во всех конечных элементах рамы. Результаты расчета внутренних усилий приведены в таблицах 1-3. В таблицах 4-6 произведено сравнение полученных результатов расчета с эталонными значениями.

Таблица 1 – Распределение величины продольной силы  $N$  в конечных элементах рамы

$N$	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты.	К.Э. средней высоты.	К.Э. минимальной высоты.	К.Э. максимальной высоты.	К.Э. средней высоты.	К.Э. минимальной высоты.	Теоретические значения усилий
		кН	кН	кН	кН	кН	кН	кН	кН
Стойка	1	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	2	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	3	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	4	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	5	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	6	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	7	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	8	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
	9	-241,63	-241,63	-241,63	-241,63	-230,02	-230,23	-230,85	-241,63
Ригель	10	-211,41	-210,97	-211,07	-211,12	-206,14	-205,93	-206,36	-210,04
	11	-207,91	-207,47	-207,57	-207,62	-203,21	-203,15	-203,36	-206,57
	12	-204,41	-203,97	-204,07	-204,12	-200,28	-200,37	-200,37	-203,09
	13	-200,91	-200,47	-200,57	-200,62	-197,34	-197,59	-197,37	-199,61
	14	-197,41	-196,97	-197,07	-197,12	-194,41	-194,81	-194,37	-196,14
	15	-193,91	-193,47	-193,57	-193,62	-191,48	-192,02	-191,38	-192,66
	16	-190,41	-189,97	-190,07	-190,12	-188,55	-189,24	-188,38	-189,18
	17	-186,91	-186,47	-186,57	-186,62	-185,62	-186,46	-185,38	-185,71
	17	-183,41	-182,97	-183,07	-183,12	-182,69	-183,68	-182,39	-182,23

Таблица 2 – Распределение величины изгибающего момента  $M$  в конечных элементах рамы

$M$	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.	Теоретические значения усилий
Стойка	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	110,79	110,53	110,58	110,62	109,99	110,24	109,23	109,97
	3	221,59	221,06	221,17	221,23	219,97	216,16	218,47	219,93
	4	443,17	442,11	442,34	442,47	439,95	436,64	436,94	439,87
	5	664,76	663,17	663,51	663,70	659,92	657,12	655,41	659,80
	6	886,35	884,22	884,68	884,94	879,90	877,60	873,88	879,73
	7	1107,93	1105,28	1105,85	1106,17	1099,87	1098,08	1092,35	1099,67
	8	1329,52	1326,33	1327,02	1327,40	1319,85	1318,56	1310,81	1319,60
	9	1551,10	1547,39	1548,19	1548,64	1539,82	1539,04	1529,28	1539,53
Ригель	9	1772,69	1768,44	1769,36	1769,87	1777,05	1776,79	1765,07	1759,47
	10	-1772,69	-1768,44	-1769,36	-1769,87	-1772,84	-1780,73	-1769,82	-1759,47
	11	-1157,74	-1153,34	-1154,29	-1154,82	-1157,99	-1163,77	-1155,98	-1144,04
	12	-633,40	-628,85	-629,83	-630,38	-634,03	-637,57	-633,02	-619,22
	13	-199,68	-194,96	-195,98	-196,55	-200,34	-201,63	-200,35	-185,01
	14	143,44	148,31	147,26	146,67	143,06	144,07	142,01	158,59
	15	395,95	400,97	399,89	399,28	396,18	399,53	394,08	411,58
	16	557,85	563,02	561,91	561,28	559,02	564,73	555,85	573,96
	17	629,13	634,46	633,32	632,67	631,57	639,69	627,32	645,73
	17	609,81	615,29	614,12	613,45	622,98	633,59	617,61	626,89

Таблица 3 – Распределение величины поперечной силы  $Q$  в конечных элементах рамы

$Q$	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.	Теоретические значения усилий
Стойка	1	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	2	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	3	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	4	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	5	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	6	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	7	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	8	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	9	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
Ригель	9	184,66	184,21	184,31	184,36	197,35	197,81	196,19	183,28
	10	218,60	218,65	218,64	218,64	222,18	223,00	221,81	218,76
	11	188,60	188,65	188,64	188,64	192,15	192,97	191,78	188,97
	12	158,60	158,65	158,64	158,64	162,15	162,97	161,78	159,17
	13	128,60	128,65	128,64	128,64	132,15	132,97	131,78	129,37
	14	98,60	98,65	98,64	98,64	102,15	102,97	101,78	99,57
	15	68,60	68,65	68,64	68,64	72,15	72,97	71,78	69,77
	16	38,60	38,65	38,64	38,64	42,15	42,97	41,78	39,98

Q	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.	Теоретические значения усилий
	17	8,60	8,65	8,64	8,64	12,15	12,97	11,78	10,18
17	-21,40	-21,35	-21,36	-21,36	-17,85	-17,03	-18,22	-19,62	

Таблица 4 – Отклонение величины продольной силы  $N$  в конечных элементах от эталонного расчета

N	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.
		%	%	%	%	%	%	%
Стойка	1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	2	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	3	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	4	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	5	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	6	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	7	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	8	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
	9	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-4,80%	-4,72%	-4,46%
Ригель	10	0,65%	0,44%	0,49%	0,51%	-1,86%	-1,96%	-1,75%
	11	0,65%	0,44%	0,49%	0,51%	-1,63%	-1,65%	-1,55%
	12	0,65%	0,43%	0,48%	0,51%	-1,38%	-1,34%	-1,34%
	13	0,65%	0,43%	0,48%	0,50%	-1,14%	-1,01%	-1,12%
	14	0,65%	0,42%	0,48%	0,50%	-0,88%	-0,68%	-0,90%
	15	0,65%	0,42%	0,47%	0,50%	-0,61%	-0,33%	-0,67%
	16	0,65%	0,41%	0,47%	0,49%	-0,34%	0,03%	-0,43%
	17	0,65%	0,41%	0,46%	0,49%	-0,05%	0,40%	-0,18%
	17	0,65%	0,40%	0,46%	0,49%	0,25%	0,79%	0,09%

Таблица 5 – Отклонение величины изгибающего момента  $M$  в конечных элементах от эталонного расчета

M	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.
		%	%	%	%	%	%	%
Стойка	1	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
	2	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	0,25%	-0,67%
	3	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-1,72%	-0,67%
	4	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,73%	-0,67%
	5	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,41%	-0,67%
	6	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,24%	-0,67%
	7	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,14%	-0,67%
	8	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,08%	-0,67%

M	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.
Ригель	9	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,02%	-0,03%	-0,67%
	9	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	1,00%	0,98%	0,32%
	10	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	0,76%	1,21%	0,59%
	11	1,20%	0,81%	0,90%	0,94%	1,22%	1,72%	1,04%
	12	2,29%	1,56%	1,71%	1,80%	2,39%	2,96%	2,23%
	13	7,93%	5,38%	5,93%	6,24%	8,29%	8,99%	8,29%
	14	-9,55%	-6,48%	-7,15%	-7,52%	-9,79%	-9,16%	-10,46%
	15	-3,80%	-2,58%	-2,84%	-2,99%	-3,74%	-2,93%	-4,25%
	16	-2,81%	-1,91%	-2,10%	-2,21%	-2,60%	-1,61%	-3,16%
	17	-2,57%	-1,75%	-1,92%	-2,02%	-2,19%	-0,94%	-2,85%
	17	-2,72%	-1,85%	-2,04%	-2,14%	-0,62%	1,07%	-1,48%

Таблица б – Отклонение величины поперечной силы  $Q$  в конечных элементах от эталонного расчета

Q	№ конечного элемента	К.Э. переменной высоты.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. средней высоты. Совмещение по оси.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по оси.	К.Э. максимальной высоты. Совмещение по грани.	К.Э. средней высоты. Совмещение по грани.	К.Э. минимальной высоты. Совмещение по гран.
Стойка	1	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	2	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	3	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	4	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	5	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	6	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	7	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	8	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
	9	0,75%	0,51%	0,56%	0,59%	7,68%	7,93%	7,05%
Ригель	10	-0,07%	-0,05%	-0,06%	-0,06%	1,56%	1,94%	1,39%
	11	-0,19%	-0,17%	-0,17%	-0,17%	1,69%	2,12%	1,49%
	12	-0,36%	-0,33%	-0,33%	-0,33%	1,87%	2,39%	1,64%
	13	-0,60%	-0,56%	-0,56%	-0,56%	2,15%	2,78%	1,86%
	14	-0,98%	-0,93%	-0,94%	-0,94%	2,59%	3,41%	2,22%
	15	-1,68%	-1,61%	-1,63%	-1,63%	3,40%	4,58%	2,87%
	16	-3,44%	-3,32%	-3,34%	-3,34%	5,44%	7,49%	4,51%
	17	-15,51%	-15,02%	-15,12%	-15,12%	19,37%	27,43%	15,73%
17	9,08%	8,82%	8,87%	8,87%	-9,02%	-13,20%	-7,13%	

Анализ результатов расчета показал, что величина продольной силы в стойках расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов не отличается от эталонной. Величина продольной силы в стойках расчетных

моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани отличается от эталонной на 4,4-1,8% в меньшую сторону.

Величина продольной силы в ригелях расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов близка к эталонной. Отличие составляет 0,4-0,65% в большую сторону. Величина продольной силы в ригелях расчетных моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани имеет отличия от эталонной. Величина отличий составляет от 0,8 до 2,0% как в меньшую, так и в большую стороны.

Величина изгибающих моментов в стойках расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов близка к эталонной. Отличие составляет 0,51-0,75% в большую сторону. Величина продольной силы в стойках расчетных моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани также близка к эталонной. Отличие составляет от 0,02 до 1,72% как в большую, так и в меньшую стороны.

Величина продольной силы в ригелях расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов отличается от эталонной. Отличие составляет 0,5-9,55% как в большую, так и в меньшую стороны. Величина продольной силы в ригелях расчетных моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани имеет отличия от эталонной. Величина отличий составляет от 0,6 до 10,43% как в меньшую, так и в большую стороны.

Величина поперечных сил в стойках расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов близка к эталонной. Отличие составляет 0,51-0,75% в большую сторону. Величина продольной силы в стойках расчетных моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани на 7,1-7,9% отличается от эталонной в большую сторону.

Величина поперечных сил в ригелях расчетных моделей с осевым выравниванием конечных элементов отличается от эталонной. Отличие составляет 0,5-15,51% как в большую, так и в меньшую стороны. Величина продольной силы в ригелях расчетных моделей с выравниванием конечных элементов вдоль наружной грани имеет отличия от эталонной. Величина

отличий составляет от 1,39 до 13,20% как в меньшую, так и в большую стороны.

При расчетах по I группе предельных состояний (по прочности и по устойчивости) наибольшее влияние на результат оказывают изгибающий момент и продольная сила.

Минимальное отличие от эталонных значений в данном случае имеют расчетные модели, построенные с осевым совмещением конечных элементов. Среди четырех рассмотренных вариантов наибольшую сходимость имеет вариант с максимальным размером конечных элементов. Отклонения значений продольной силы в стойке отсутствуют, отклонения изгибающих моментов в стойке составляют 0,51%. Отклонения значений продольной силы в ригеле составляют 0,40-0,44%, отклонения изгибающих моментов в ригеле составляют от 0,51% в большую сторону до 6,48% в меньшую сторону. Здесь следует отметить, что эпюра изгибающих моментов в ригеле в зоне конька и в зоне примыкания к стойке имеет максимальные изгибающие моменты разного знака. В зоне конька отклонения изгибающего момента составляют 1,85% в меньшую сторону. В зоне примыкания ригеля к стойке отклонения изгибающего момента составляют 0,51% в большую сторону.

Максимальное отклонение значений изгибающего момента, составляющее 6,48%, приходится на участок ригеля, где эпюра изгибающего момента меняет знак. На этом участке величина изгибающего момента составляет примерно 20-25% от максимального конькового момента. С учетом того, что высота сечения ригеля на этом участке больше высоты сечения в коньке, никакого серьезного влияния на несущую способность ригеля неточность определения изгибающего момента не окажет.

Таким образом, для конструктивных расчетов стальных рам переменного по высоте сечения можно предложить использовать модели, в которых переменное сечение аппроксимируется конечными элементами постоянной высоты, совмещаемыми в уровне осей конечных элементов. Высоту конечных

элементов следует назначать по максимальной высоте соответствующего конечного элемента переменного сечения.

**Библиографический список:**

1. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. М.: Минстрой РФ, 2014.

2. Федеральный закон от 30 декабря 2009 года №384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" М.: РГ Федеральный выпуск №5079, 2009.

3. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. – М.: Минстрой РФ, 2017.

4. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). – М.: ОАО "Издательство "Стройиздат", 2005.