

УДК 624.014

Вахтель Р.Р. – старший преподаватель

E-mail: v_roman@bk.ru

Исаев А.В. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: isaev@kgasu.ru

Закиров Р.А. – студент

E-mail: Futurama1991@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния стальных рам

Аннотация

В статье рассматриваются натурные испытания двух рам: рамы сплошного сечения и рамы с расщеплением в уровне карнизного узла. Целью данного эксперимента является подтверждение теоретических исследований и сравнение несущей способности рам. Рассмотрена методика проведения эксперимента, описание экспериментальной установки и образцов. Приведены результаты испытаний, являющиеся основанием для дальнейшего изучения напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: рама, конструкция узла, испытания, надежность, предельное состояние.

Усилия в раме и теоретические исследования выполнены в [1]. В ходе исследований напряженно-деформированного состояния, были произведены эксперименты с реальными моделями рам. Характеристики моделей:



Рис. 1. Общий вид рамы 1

Применяемый класс стали рамы 1 и 2 – С245.

Сечение рамы 1 [6] выполнено сплошным по ригелю и стойке из прокатного двутавра № 12. Для обеспечения устойчивости рам, в уровне ригеля были приварены металлические связи.

В связи с неточностями соответствия размеров проката размерам, указанным в сортаменте для данного двутавра, были взяты реальные размеры сечения.

Соединение ригеля и стойки выполнено жестким, на сварке (рис. 1).



Рис. 2. Соединение ригеля и стойки рамы 1

Соединение ригеля в коньковой части выполнено посредством фланцевого соединения на болтах класса прочности 8.8. База выполнена по типу шарнирного соединения, с креплением к силовому полу с помощью болтов класса прочности 8.8, и ребер в плоскости рамы.

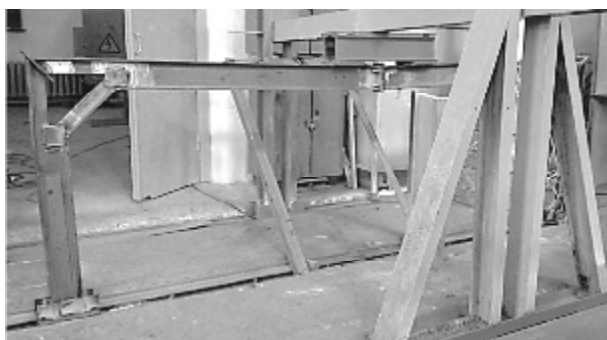


Рис. 3. Общий вид рамы 2

Сечение рамы 2 выполнено сплошным из прокатного двутавра № 12, с использованием подкосной системы. При этом каждый подкос образован путем продольных резки профилей стыкуемых концов стойки и ригеля с последующим отгибом их нижних частей [2]. Длина продольного реза по стенке двутавра составляет 0,3 м (рис. 3). Таким образом, карнизный узел представляет собой решетчатую схему, с подкосами под углом 45 градусов. Все соединения выполнены жесткими, на сварке (рис. 4).

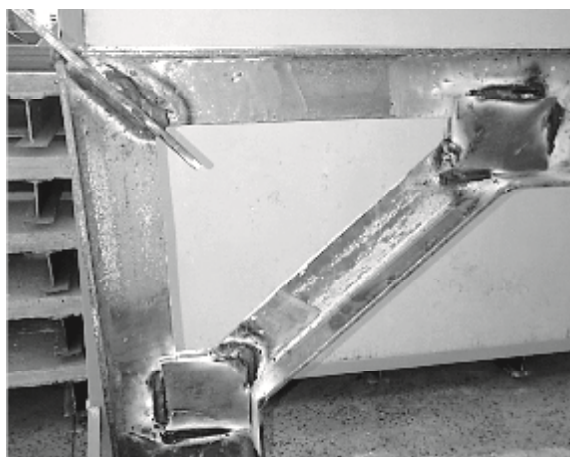


Рис. 4. Карнизный узел рамы 2

Коньковый узел и база рамы 2 выполнен аналогично коньковому узлу и базе рамы 1. Нагрузки на рамы прикладывались статически. Нагрузки прикладывались через рычажную систему [7, 8, 9], где коэффициент рычажной передачи усилия в точке В составлял $k=3,01$ (рис. 5).

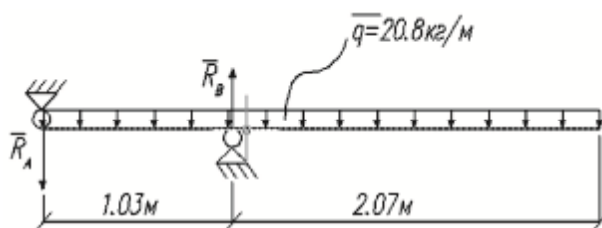


Рис. 5. Расчетная схема рычажной системы приложения нагрузок на испытываемые рамы

Балка рычага составлена из двух швеллеров № 12. Погонная нагрузка равна 10,4 кг/м. Полная нагрузка от балки:

$$q_{св} = 10,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}} \cdot 2 = 20,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

Составим уравнение моментов относительно точки А и найдем нагрузку, передаваемую на раму:

$$\sum m_A = R_B \cdot 1,03 \text{ м} - 20,8 \text{ кг/м} \cdot 3,1 \text{ м} \cdot \frac{3,1 \text{ м}}{2} = 0,$$

$$R_B = \frac{20,8 \text{ кг/м} \cdot 3,1 \text{ м} \cdot 1,55 \text{ м}}{2} = 97,03 \text{ кг}.$$

Нагрузка от собственного веса балки рычажной системы на раму составляла 97,03 кг. Нагрузка непосредственно на раму передавалась через траверсу, весом 29 кг (рис. 6).



Рис. 6. Передача нагрузок на раму через рычажную систему и траверсу

Вес корзины для складывания пригрузов также учитывался. Вес корзины составлял 34 кг, что с учетом $k=3,01$ давало нагрузку на раму в 102,34 кг.

Пригрузами служили металлические пластины, каждая весом ~50 кг, что с учетом $k=3,01$ давало нагрузку на раму в 150 кг. Всего было приложено 19 пластин, и таким образом, количество шагов составило 21. Диаграмма пошагового прикладывания нагрузок показана на рис. 11.

Испытания проводились в лаборатории кафедры «Металлические конструкции и испытания сооружений» Казанского Государственного Архитектурно-Строительного Университета. Использовалась рычажная установка с коэффициентом передачи нагрузки $k=3,01$. Механические напряжения в конструкциях измерялись с помощью электронного измерителя деформаций АИД-4 и тензорезисторных датчиков. Вертикальные и горизонтальные перемещения в характерных точках измерялись индикаторами часового типа.

Принцип работы тензорезисторного датчика [8, 9] заключается в том, что под действием растягивающего/сжимающего усилия, которое меняет геометрические характеристики проводника, изменяется и его электрическое сопротивление. Это изменение можно измерить и сопоставить со степенью деформации датчика, которая, в свою очередь, может быть сопоставлена со степенью деформации исследуемого образца. Схемы установки тензорезисторных датчиков показаны на рис. 7-10.

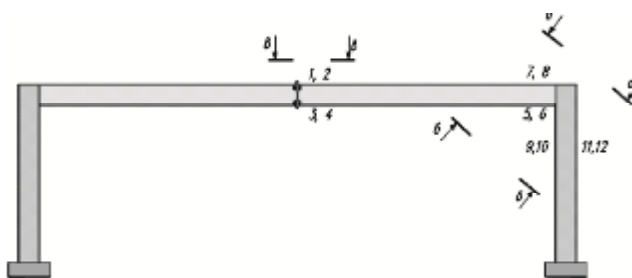


Рис. 7. Схема установки тензорезисторных датчиков на раме 1

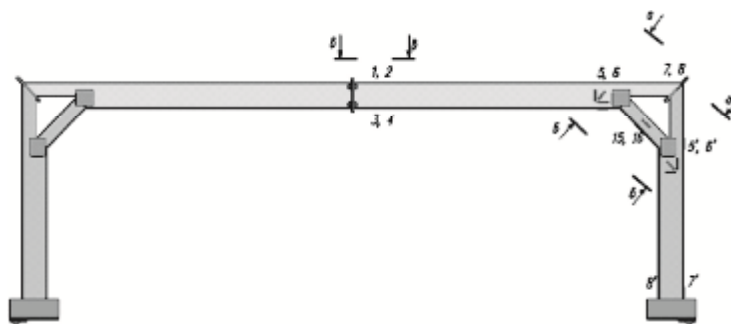


Рис. 8. (слева направо): карнизный узел – сечение а-а (пространственный вид сверху);
 карнизный узел – сечение б-б (пространственный вид снизу);
 коньковый узел – сечение в-в (пространственный вид сверху)

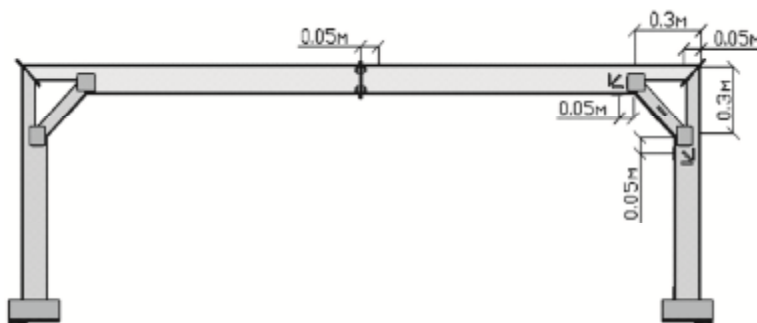


Рис. 9. Схема установки тензорезисторных датчиков на раме 2

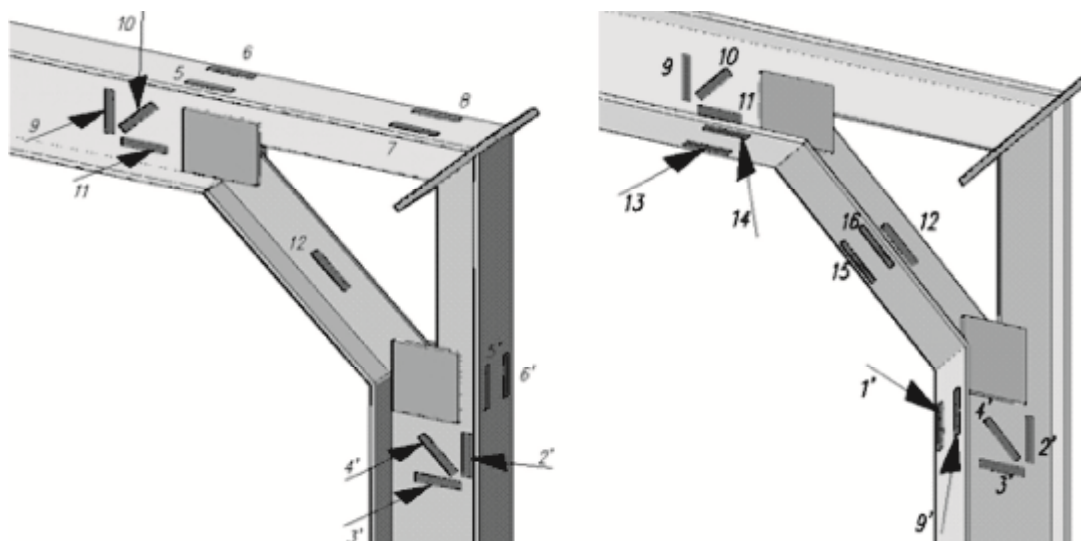


Рис. 10. (слева направо): карнизный узел – сечение а-а (пространственный вид сверху);
 карнизный узел – сечение б-б (пространственный вид снизу)

Методика проведения натурного эксперимента с реальными моделями рам состояла в следующем:

Рама загружалась нагрузками пошагово, в соответствии с диаграммой на рис. 11. На этапе 1 эксперимента, снимались показания напряжений только от собственного веса рамы. Для полной проработки всех болтовых соединений, исключения эффекта заклинивания, выработки люфтов и зазоров, рамы нагружались пошагово до нагрузки в 662 кг, что соответствует шагу 5 эксперимента (задолго до предела текучести, для исключения явления наклепа).

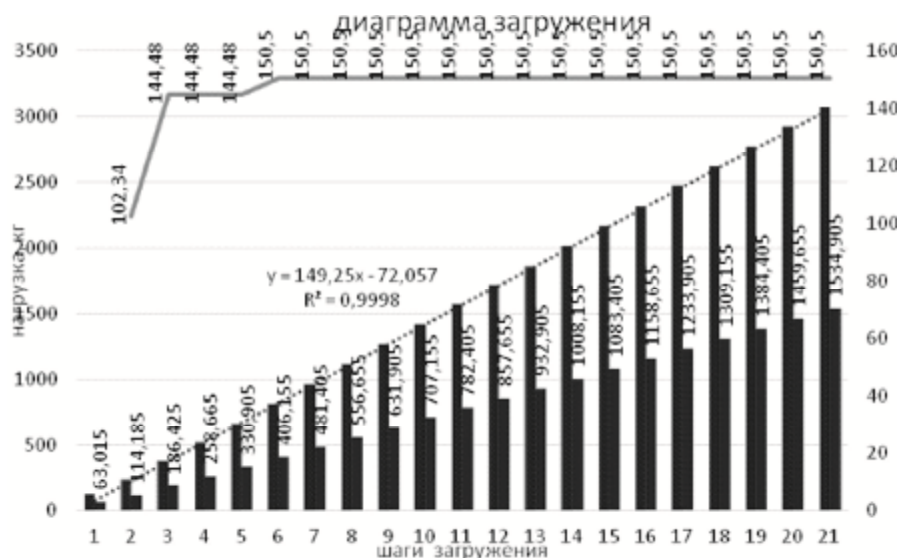


Рис. 11. Диаграмма пошагового нагружения испытываемых рам

Вместе с этим, после каждого шага, с интервалом в 5-90 минут после добавления нагрузки, снимались показания напряжений и деформаций, для того чтобы конструкция рамы пришли в состояние покоя под нагрузкой.

Следующим этапом была разгрузка рамы. После полной разгрузки рамы снова снимались показания напряжений от собственного веса C_0 , которые в дальнейшем принимались за исходные.

Далее аналогично этапу 1, рама пошагово загружалась сначала траверсой и балкой рычажной установки (шаг 1), затем пригрузом в виде корзины (шаг 2), и далее шла загрузка основными пригрузами в виде металлических пластин (шаги 3-21) до полного разрушения конструкции.

После каждого шага, также с интервалом в 5-90 минут после добавления нагрузки, чтобы рамы пришли в состояние покоя, снимались показания напряжений и деформаций с помощью датчиков.

Для нахождения напряжений, условные единицы, выдаваемые прибором после каждого шага C_i преобразовывались в килограммы на сантиметр в квадрате σ_i (кг/см²). Для этого находилась разность между условными единицами на шаге и первоначальными, по формуле:

$$C_i - C_0 = \Delta C_i.$$

Полученную разность значений умножали на цену деления прибора. Для используемого измерителя деформаций АИД-4, цена деления составляет величину 10^5 (согласно паспорта прибора). Также значение умножали на модуль упругости стали. Полученная формула принимает вид:

$$\sigma_i = \Delta C_i \cdot 10^5 \cdot E = \Delta C_i \cdot 10^5 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \frac{\text{КГ}}{\text{СМ}^2} = \Delta C_i \cdot 21 \frac{\text{КГ}}{\text{СМ}^2}.$$

Полученные результаты заносились в таблицы, по результатам полученных значений горизонтальных перемещений стойки в характерной точке 0,3 м от карниза рамы, вертикальных прогибов ригеля в коньке рамы, и значений нормальных и касательных напряжений в местах установки тензодатчиков, строились графики зависимости напряжений от нагрузки (рис. 12, рис. 13) и зависимости перемещений от нагрузки (рис. 19).

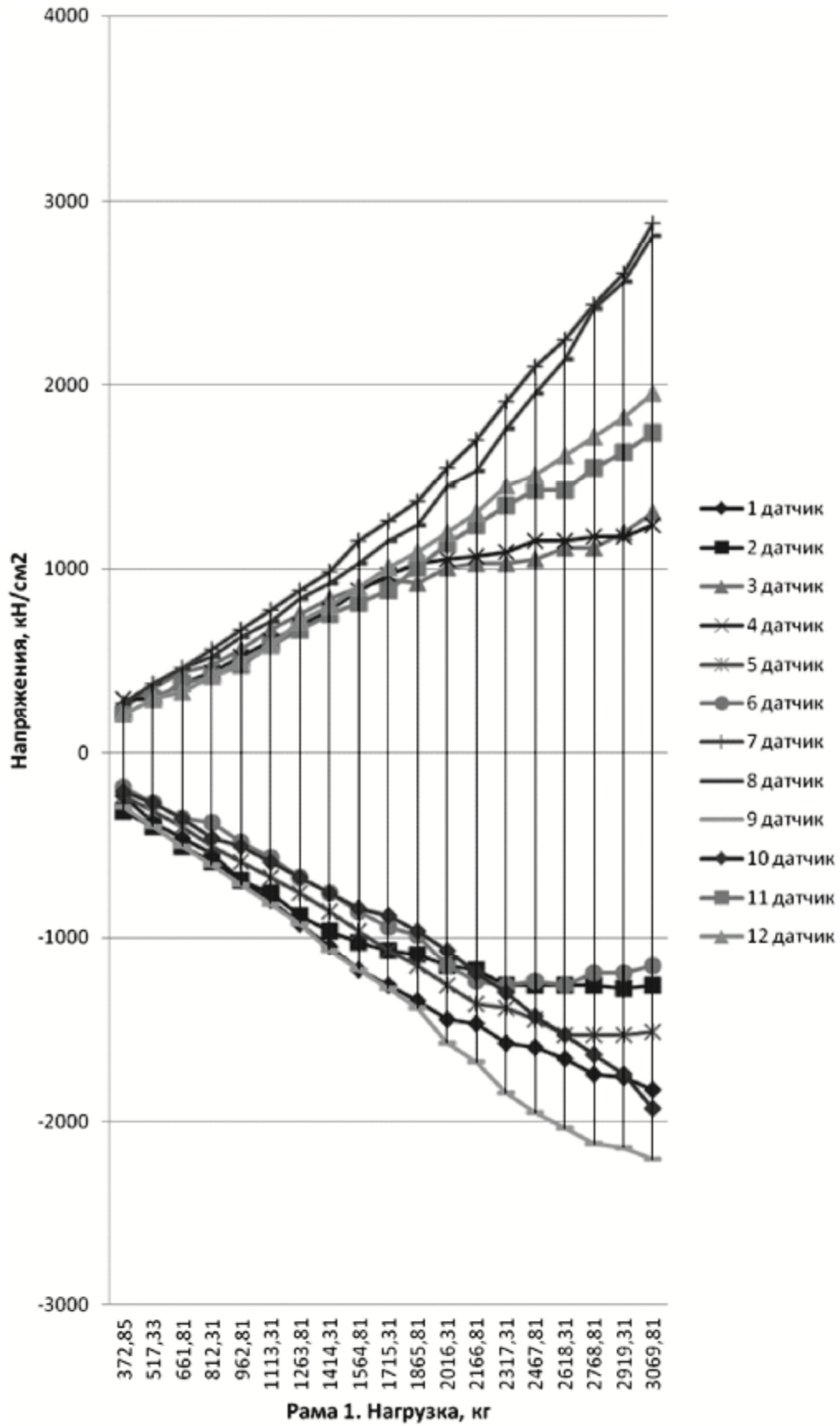


Рис. 12. График изменения напряжений от нагрузки на раме 1

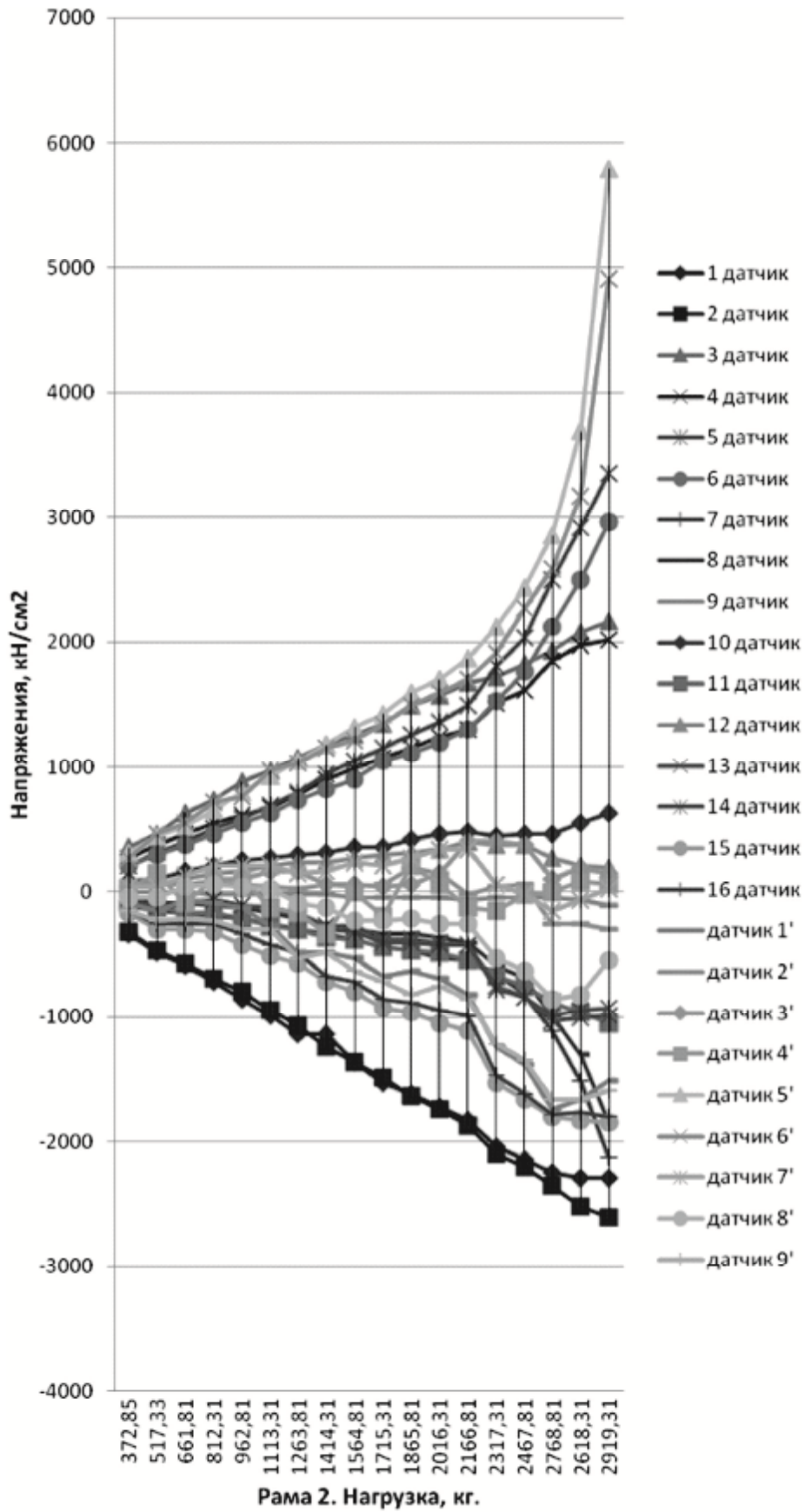


Рис. 13. График изменения напряжений от нагрузки на раме 2

Из анализа результатов натурального, а также численных экспериментов [3], приведенных рам в качестве планирования, практический интерес представляет не только сравнение несущей способности рам, но и соотношение напряжений и внутренних усилий в расчетных сечениях каждой рамы в отдельности. Указанные данные позволяют судить о поведении рамы, как статически-неопределимой системы, в упругопластической стадии с выявлением предельного состояния рассматриваемых рам.

Обработка результатов натурального эксперимента выполнена с определением значений фибровых напряжений и построением эпюр нормальных напряжений в расчетных сечениях [4, 5] в сравнении с результатами численных экспериментов. На рис. 14 указана схема распределения напряжений (в упругой стадии) в расчетном сечении рамы.

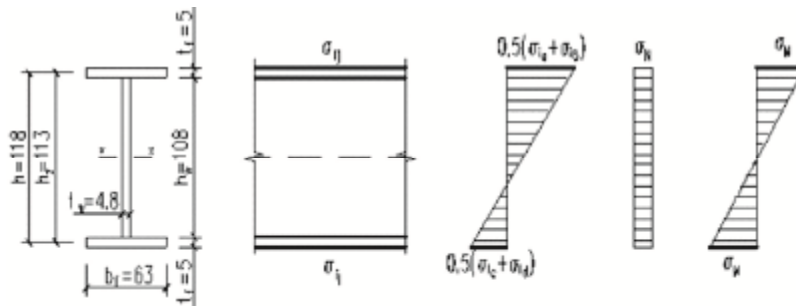


Рис. 14. Схема распределения напряжений в расчетном сечении

Осредненные значения напряжений на фибрах сечения определены по формуле для двух тензодатчиков:

$$\sigma_{icp}^B = (\sigma_{iA} + \sigma_{iB}) \times 0,5; \sigma_{icp}^H = (\sigma_{iC} + \sigma_{iD}) \times 0,5,$$

где $\sigma_{iA}; \sigma_{iB}; \sigma_{iC}; \sigma_{iD}$ – показание датчиков при i-ой нагрузке.

Значение напряжений от осевой силы определены из суммарной эпюры по формуле:

$$\sigma_N = \frac{\sigma_{icp}^B + \sigma_{icp}^H}{2}.$$

Значение для нормальных напряжений от изгибающего момента:

$$\sigma_M^B = \sigma_{icp}^B \pm \sigma_N; \sigma_M^H = \sigma_{icp}^H \pm \sigma_N; \sigma_M^B = \sigma_M^H$$

Внутренние усилия в сечении определены по известным геометрическим характеристикам для рассматриваемых рам, а также исходя из уравнения равновесия напряжений (рис. 15).

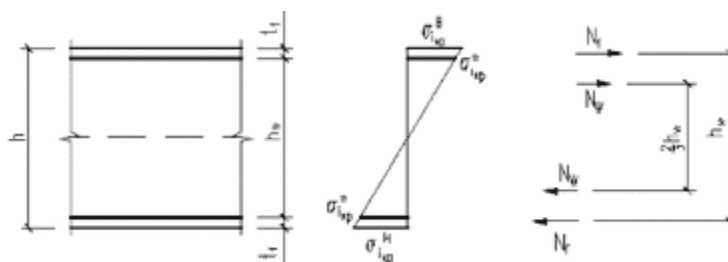


Рис. 15. К определению внутреннего момента в сечении

Осевая сила: $N = \sigma_N \times A_{сеч}$;

Изгибающий момент внутренней пары сил:

$$M_{сеч} = M_f + M_w = N_f \times h_z + N_w \times \frac{2}{3} h_w; N_f = \frac{\sigma_{icp}^B + \sigma_{icp}^H}{2} \times t_f \times b;$$

$$N_w = \frac{\sigma_{icp}^w \times t_w \times h_w}{4}; \sigma_{icp}^w = \sigma_{icp}^B \times \frac{h_w}{4}.$$

Указанная методика реализована в приложении Microsoft EXCEL с построением эпюр напряжений в расчетных сечениях и внутренних усилий. По результатам обработки данных тензорезисторных датчиков приведены диаграммы распределения напряжений, а также соотношений внутренних усилий в коньковом и карнизном узлах рам (рис. 16-18).

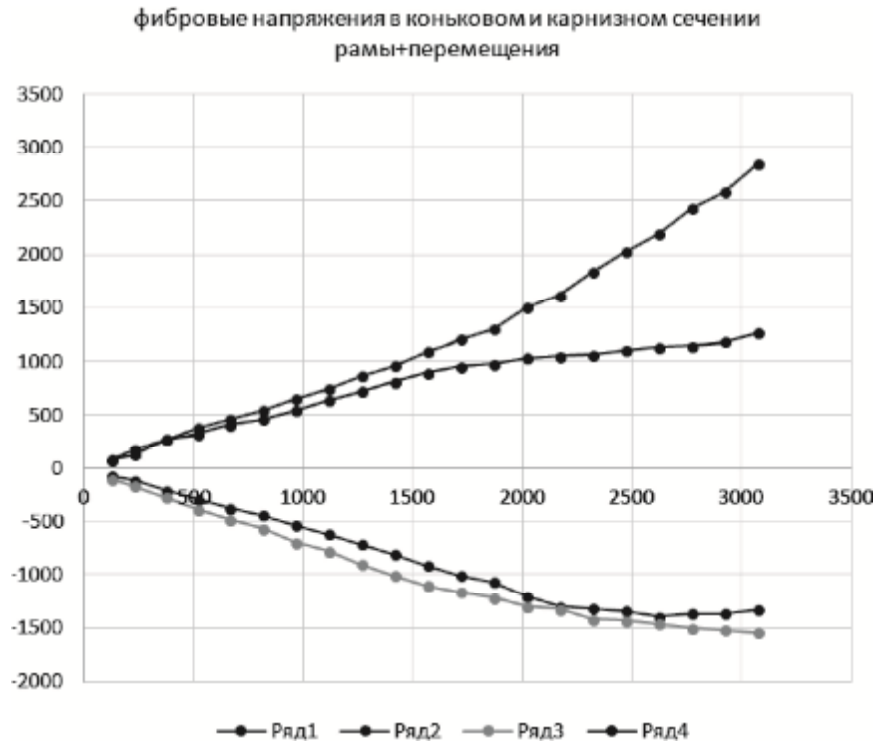


Рис. 16. Распределение осредненных напряжений в расчетных сечениях рамы 1

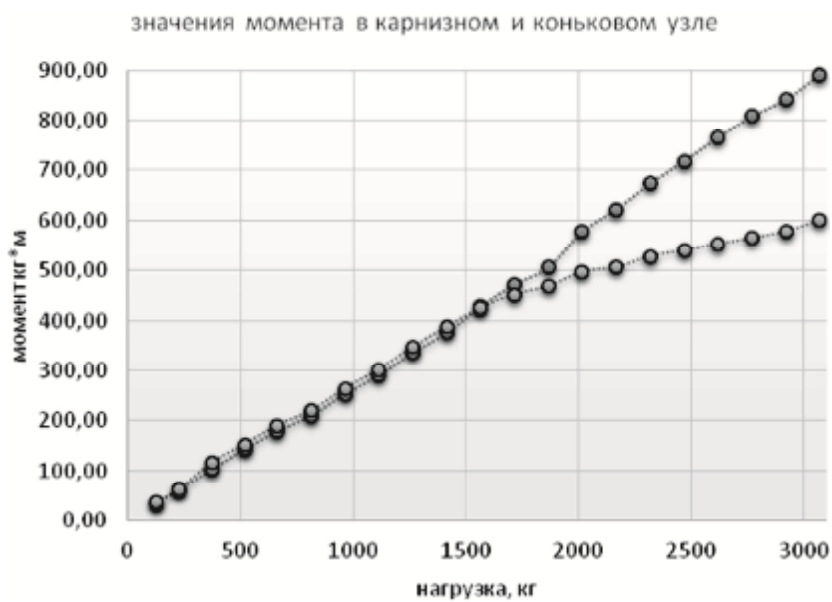


Рис. 17. Изменение изгибающего момента в расчетных сечениях рамы 1 от нагрузки

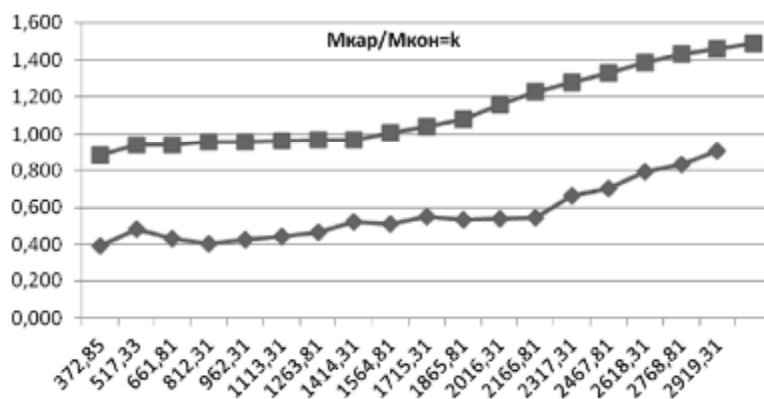


Рис. 18. Изменение соотношений изгибающего момента в расчетных сечениях рамы 1 и 2 от нагрузки

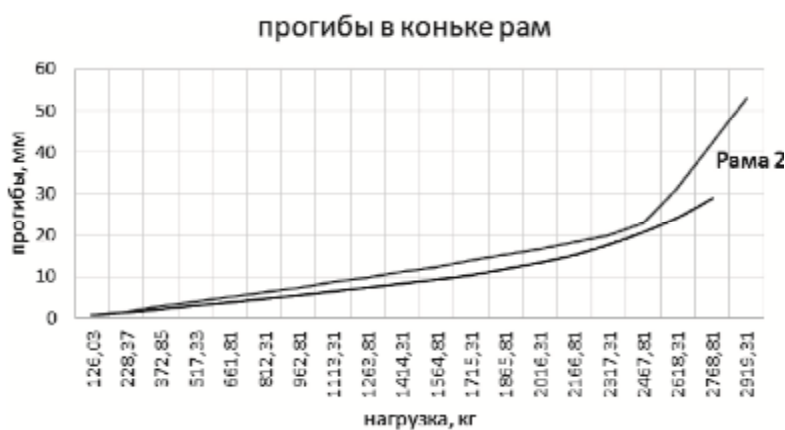


Рис. 19. Зависимости прогибов от нагрузки в коньке. Рама 1, 2

Исчерпание несущей способности по критерию развития пластических деформаций для рамы 1 и 2 зафиксировано при нагрузке 2768,8 кг, однако разрушение рам зафиксировано при нагрузках для рамы 1 – 3069 кг, а для рамы 2 – 3220 кг, что свидетельствует о повышенной несущей способности рамы за счет внутренней статической неопределенности рамы.

Список библиографических ссылок

1. Вахтель Р.Р., Исаев А.В. Определение оптимальных параметров стальных рам. Эффективные строительные конструкции: Теория и практика, 2013. – Пенза: XIII Международная научно-практическая конференция. – С. 22-25.
2. Патент РФ № 204111210/03, 05.04.2004. Кузнецов И.Л., Вахтель Р.Р. Стальная рама // Патент России № 2263190.
3. Вахтель Р.Р, Исаев А.В, Ефимов О.И, Закиров Р.А. К расчету рамы с расщеплением сечения в уровне карнизного узла. // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ. URL: www.science-education.ru/120-15704 (дата обращения: 03.12.2014).
4. Дарков А.В. Строительная механика. Изд.7-е, перераб. и доп. – М., «Высш. школа», 1976. – 86 с.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический в 2-х кн. Кн.1 под ред. А.А. Уманского. Изд. 2-у перераб. – М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.

6. Енджиевский Л.В., Наделев В.Д., Петухова И.Я. Каркасы зданий из легких металлических конструкций и их элементы: Учебное пособие; Изд-во АСВ. – М., 1998. – 247 с.
7. Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1987. – 263 с.
8. Леденев В.В., Ярцев В.П. Испытание материалов и конструкций зданий и сооружений: Учеб. пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1994. – 220 с.
9. Золотухин Ю.Д. Испытание строительных конструкций: Учеб. пособие. – Минск: Высшая школа, 1983. – 208 с.

Vahtel R.R. – senior lecturer

E-mail: v_roman@bk.ru

Isaev A.V. – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: Isaev@kgasu.ru

Zakirov R.A. – student

E-mail: Futurama1991@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Experimental studies of a stress-strain state of the steel frame

Resume

In article natural tests of two frames are considered: frame of continuous section and a frame with splitting in the level of eaves knot. The purpose of this experiment is confirmation of theoretical researches and comparison of the bearing ability of frames. The technique of carrying out experiment, the description of experimental installation and samples are considered. The results of tests which are the basis for further studying of the intense deformed state are given. From the analysis of results natural, and also numerical experiments, the given frames as planning, not only comparison of the bearing ability of frames, but also a ratio of tension and internal efforts in settlement sections of each frame separately represents practical interest. Processing of results of natural experiment is executed with determination of values of fiber tension and construction diagram normal tension in settlement sections in comparison with results of numerical experiments. By results of data processing the tensoresistor of sensors charts of distribution of tension, and also ratios of internal efforts are provided in ridge and eaves knots of frames. The specified data allows to judge behavior of the frame, as static and indefinable system, in an elasto-plastic stage with identification of a limit condition of the considered frames. Exhaustion of the bearing ability by criterion of development of plastic deformations for the frame 1 and 2 is recorded at loading of 2768,8 kg, however destruction of frames is recorded at loadings for the frame of 1 – 3069 kg, and for the frame of 2 – 3220 kg that testifies to the increased bearing ability of the frame due to internal static indefinability of the frame.

Keywords: frame, construction site, testing, reliability, limit state.

References list

1. Vachtel R.R., Isaev A.V. Determination of the optimal parameters of steel frames. Efficient building design: Theory and Practice, 2013. – Penza: XIII International Scientific and Practical Conference. – P. 22-25.
2. The patent of the Russian Federation № 204111210/03, 05.04.2004. Kuznetsov I.L., Vachtel R.R. Steel frame // Russian Patent № 2263190.
3. Vachtel R.R., Isaev A.V., Efimov O.I., Zakirov R.A. The calculation of the frame with a splitting section in the eaves node level. // Modern problems of science and education. URL: www.science-education.ru/120-15704 (reference date: 12.03.2014).
4. Darkov A.V. Structural Mechanics. Izd.7 th, revised. and add. – М., «Executive. School», 1976. – 86 p.

5. Reference designer of industrial, residential and public buildings. Settlement and theoretical in 2 Vol. Book 1, ed. A.A. Umansky. Ed. 2-in rev. – M.: Stroyizdat, 1972. – 600 p.
6. Endzhievsky L.V., Nadelev V.D., Petukhova I.J. Building frames made of light metal structures and their elements: the manual; Publishing house of the DIA. – M., 1998. – 247 p.
7. Luzhin O.V., Zlochevskiy A.B., Gorbunov I.A., Volohov V.A. Inspection and testing facilities: Proc. for high schools. – M.: Stroyizdat, 1987. – 263 p.
8. Ledenev V.V., Yartsev V.P. Test materials and designs of buildings and structures: Textbook. allowance. – Tambov Univ Thumb. state. tehn. University Press, 1994. – 220 p.
9. Zolotukhin Y.D. Test of building structures: Textbook. allowance. – Minsk: Higher School, 1983. – 208 p.