

УДК 624.014.074.421

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-110-119](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-110-119)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ БЕСКАРКАСНОГО ЗДАНИЯ ИЗ ТОНКОЛИСТОВЫХ СТРУКТУРНЫХ СЕКЦИЙ

И.И. ВЕДЯКОВ, д-р техн. наук

Д.В. СОЛОВЬЕВ[✉], канд. техн. наук

А.В. СМАГИН

*Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко
АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация*

Легкие металлоконструкции находят широкое применение в строительной индустрии нашей страны. Перспективным направлением развития ЛМК являются быстровозводимые бескаркасные сооружения из тонколистовых структурных секций. Область применения и условия эксплуатации таких конструкций довольно обширны. В этой связи требуется разработка грамотной инженерной методики по расчету зданий с применением тонколистовых структурных секций. В статье приведена методика проведения натурного испытания фрагмента бескаркасного здания, показаны результаты усилий и деформаций экспериментальной модели. В статье представлен подход к моделированию и размерам конечных элементов для рассматриваемых профилей. Выполнен сравнительный анализ численных данных с результатами эксперимента. Результаты работы могут быть использованы для разработки рекомендаций и инженерной методики расчета аналогичных бескаркасных зданий, определения фактической схемы работы узлов и элементов рассматриваемой конструкции.

Ключевые слова: стальные конструкции, легкие стальные тонкостенные конструкции, бескаркасные складчатые здания и сооружения с двойным гофрированием, инженерная методика расчета, гофрирование, тонколистовые структурные конструкции, численное моделирование, соединение элементов, опорный узел, ферма покрытия, панель-оболочка, прочность элементов

Для цитирования: Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Смагин А.В. Экспериментальные исследования работы бескаркасного здания из тонколистовых структурных секций // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. Т. 31. № 4. С. 110–119. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-110-119](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-110-119)

Вклад авторов

Ведяков И.И. – научное руководство, участие в составлении итоговых выводов. Соловьев Д.В. – участие в проведении эксперимента, корректировка и сопровождение основных этапов подготовки статьи, участие в составлении итоговых выводов. Смагин А.В. – анализ экспериментальных данных, выполнение численных вычислений, сопоставление результатов численного моделирования и эксперимента.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE OPERATION OF A FRAMELESS BUILDING MADE OF THIN-GAUGE STRUCTURAL SECTIONS

I.I. VEDYAKOV, Dr. Sci. (Engineering)
D.V. SOLOVYEV,  Cand. Sci. (Engineering)
A.V. SMAGIN

Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

Light metal structures (LMS) are widely spread in domestic construction industry. A promising direction for the development of LMS includes prefabricated shell structures made of thin-gauge structural sections. The scope and operating conditions of such structures are quite extensive. In this regard, the development of a competent engineering methodology for calculating buildings using thin-gauge structural sections is required. The present paper describes a method for a full-scale testing of a shell building fragment and provides the results of forces and deformations calculated using the experimental model. In addition, an approach to modeling and dimensioning of finite elements for the profiles under consideration is described. The comparative analysis of numerical data and experimental results is performed. The results of the study can be used both for developing recommendations and engineering methods for calculating similar shell buildings and for determining the actual operational scheme for units and elements of the considered structure.

Keywords: steel structures, light gauge steel framing structures, shell folded buildings and structures with double corrugation, engineering practice, corrugation, thin-gauge structures, numerical modeling, connection of elements, support node, roof truss, shell panel, strength of elements

For citation: Vedyakov I.I., Solov'yev D.V., Smagin A.V. Experimental studies of the operation of a frameless building made of thin-gauge structural sections. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021. Vol. 31. No. 4. P. 110–119 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-110-119](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-110-119)

Author contribution statements

I.I. Vedyakov: scientific leadership, conclusions. D.V. Solov'yev: experiment, article management, conclusions. A.V. Smagin: calculations, analysis of experimental and calculation data.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Использование легких металлоконструкций (ЛМК) приобретает все большее распространение в строительной индустрии нашей страны. Перспективным направлением развития ЛМК являются быстровозводимые бескаркасные сооружения из тонколистовых структурных секций. Применение в качестве несущих и ограждающих элементов профилированных листов из тонколистовой стали позволяет возводить здания без использования каркасной системы (колонн, балок, ферм и т. д.) с сохранением полезного объема сооружения.

К сооружениям, возводимым с использованием профилированных листов двойного гофрирования, можно отнести бескаркасные здания, изготавливаемые канадской компанией HONCO, имеются аналогичные конструкции и отечественного изготовления [1, 2].

Область применения сооружений из структурных секций достаточно велика. Их широко используют как склады, производственные помещения, выставочные комплексы, спортивные сооружения (крытый теннисный корт, бассейн, спортивный комплекс), крытые торговые



Рис. 1. Общие виды испытываемого фрагмента
Fig. 1. General views of the tested fragment

ряды, крытые автостоянки и автосалоны, для сезонного хранения частных самолетов и яхт, коттеджи, офисы, магазины, мастерские, цехи, склады, ангары [3, 4].

Здания бескаркасного типа имеют конструкцию, отличную от традиционных конструкций каркасов. Подтвержденная методика расчета подобных конструкций отсутствует.

Для определения фактической работы элементов, узлов и конструкций здания в целом была разработана методика испытаний фрагмента здания размером 36×6 м в плане в натуральную величину и совместно с Липецким технологическим университетом, с участием В.В. Зверева, выполнены экспериментальные исследования.

Фрагмент бескаркасного здания для натуральных испытаний состоит из торцевой стены, двух продольных стен и конструкций покрытия, представлен на фото на рис. 1. Высота несущих стен здания – 4,8 м. Максимальная высота конструкции – 8,678 м. В продольной стене натурального фрагмента был выполнен стандартный оконный проем размерами $H \times L = 1800 \times 1000$ мм (рис. 1), с типовым обрамлением. В торцевой стене – воротный проем с элементами обрамления, размерами $H \times L = 2400 \times 3000$ мм.

Основной элемент конструкции здания HONCO – стальной волнистый профилированный лист с двойным гофрированием (типовая структурная секция), шириной один метр и глубиной рифления 128 мм (рис. 2).



Рис. 2. Схема волнистого профилированного листа с двойным гофрированием
Fig. 2. Diagram of double-corrugated sheet

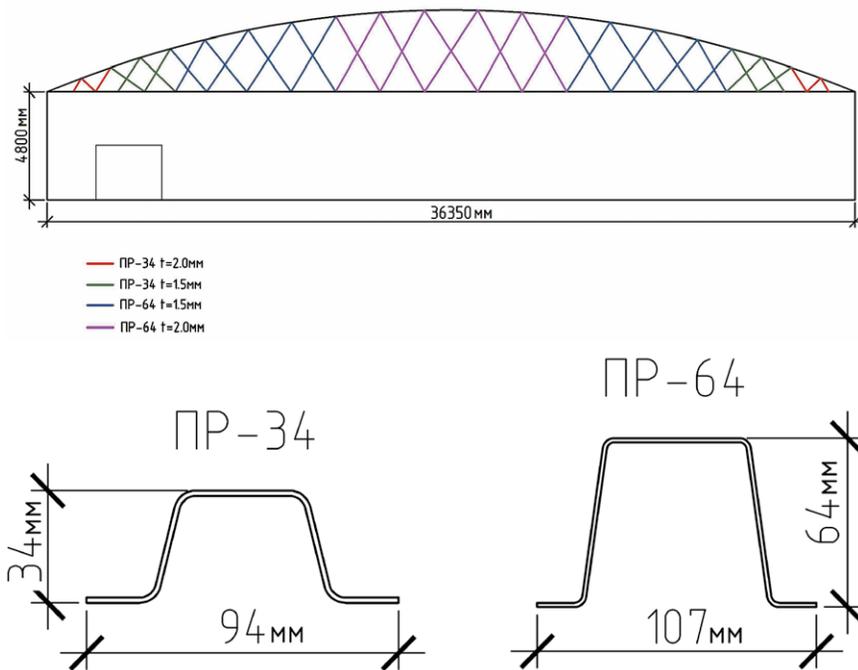


Рис. 3. Профили раскосной решетки покрытия
Fig. 3. Profiles of the plating diagonal web

Соединения структурных элементов стенового ограждения выполняются на болтах М10. В нижней части стеновые секции на болтах крепятся к специальным штампованным опорным деталям, повторяющим геометрию стенового профиля. Раскосная решетка здания выполняется из типовых гнутых профилей толщиной 1,5 и 2,0 мм, схема раскосной решетки натурального фрагмента представлена на рис. 3. Раскосы покрытия крепятся к потолочным и кровельным секциям через Г-образные фасонки на болтах М12 (рис. 4). В местах пересечения раскосов также устанавливаются болты М12. Пространственная жесткость здания в целом обеспечивается продольными и торцевыми стеновыми конструкциями и покрытием, являющимся одновременно горизонтальной диафрагмой жесткости.

Для имитации вертикальной нагрузки от веса снега при испытании использовались мешки с песком, равномерно укладываемые по поверхности кровли. Вес поддонов с мешками контролировался при каждом подъеме с помощью электронных весов, подвешенных на крюке крана.

Для приложения горизонтальной ветровой и сосредоточенной нагрузок были изготовлены две специальные опорные рамы. Нагрузка прикладывалась с «наветренной» и «подветренной» стороны. На каждой продольной стене устанавливались по три горизонтальных, специально изготовленных ригеля, повторяющих форму стеновых панелей, к которым в трех точках (по концам и в середине) прикладывалась нагрузка через систему блоков.

В связи с тем что крайние панели продольных стен не были закреплены торцевой стеной, вертикальную нагрузку прикладывали на 5 м длины покрытия.

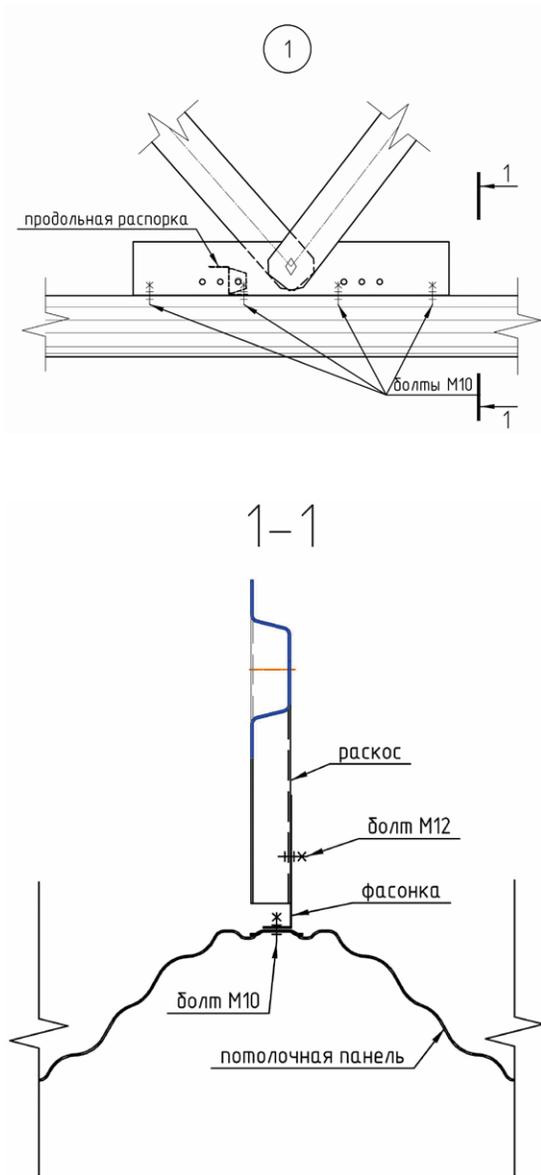


Рис. 4. Соединения элементов раскосной решетки покрытия

Fig. 4. Connections of plating diagonal web elements

геометрии и соответствующая ей приведенная жесткость не соответствуют результатам, полученным в ходе натурных испытаний. Сходимость результатов численных и экспериментальных исследований фактически отсутствовала.

Следующим этапом работы была оптимизация геометрии стенового и кровельного профиля: были сглажены острые углы конечных элементов оболочек, повторена общая геометрия профиля, приведенная жесткость сечения также была откорректирована в соответствии с новыми параметрами сечения, при этом мелкая гофра профиля также не была

В характерных точках конструкции в соответствии с программой испытаний устанавливались тензодатчики. На каждом этапе испытаний конструкции были выполнены контрольные замеры напряженно-деформированного состояния.

Для получения теоретического обоснования работы сооружения в целом и ее отдельных узлов было выполнено численное исследование напряженно-деформированного состояния конструкции при различных стадиях и условиях нагружения. Расчетная модель формировалась в нелинейной постановке с использованием специальных КЭ, реализованных в программном комплексе ЛИРА-САПР.

Граничные условия в зоне крепления к фундаментной балке были приняты шарнирными. В зоне сопряжения стеновых панелей к кровельным также принято жесткое сопряжение.

На первом этапе моделирования в расчетной схеме была использована приведенная жесткость стеновых и кровельных несущих элементов сооружения. За основу была выбрана трапециевидная форма профилированного листа, замоделированная по характерным точкам поперечного сечения листа с двойным гофрированием без учета вторичного гофрирования (рис. 5).

Приведенная жесткость панели соответствовала изгибным и жесткостным характеристикам реального сечения, используемого в экспериментальном здании. Разбиение конечно-элементной сетки было в пределах 100×100 мм. При этом анализ результатов нелинейного расчета показал, что такой тип

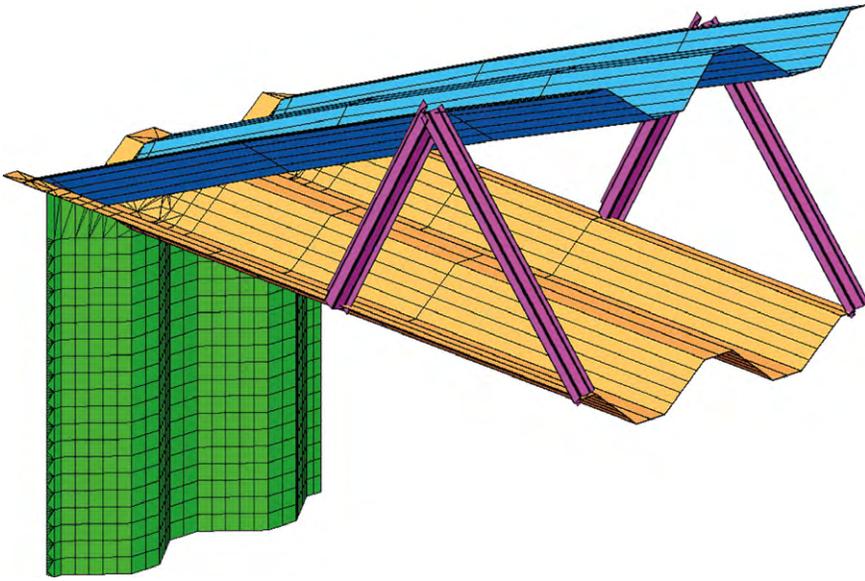


Рис. 5. Фрагмент расчетной модели испытываемого сооружения с приведенными геометрическими характеристиками

Fig. 5. Calculated model fragment of the tested structure with reduced geometric characteristics

замоделирована. Но и эти расчеты не дали нужной сходимости с результатами натурного эксперимента.

В результате итерационного процесса создания расчетной модели геометрия профиля в численной модели была выполнена максимально повторяющей фактическую геометрию профиля, а также с параметрами, отражающими реальную жесткость секций с двойным гофрированием (рис. 6).

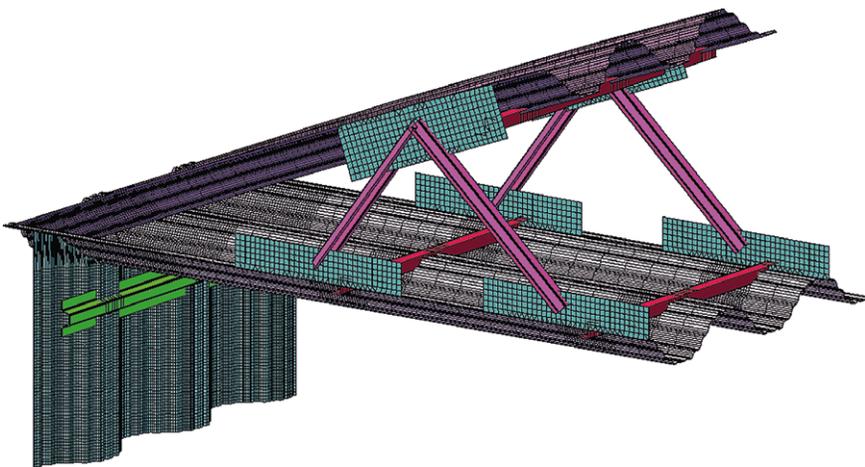


Рис. 6. Фрагмент расчетной модели испытываемого сооружения с фактическими геометрическими параметрами

Fig. 6. Calculated model fragment of the tested structure with actual geometric parameters

Стяжение конечно-элементной сетки составило в среднем 10×10 мм в стеновых панелях и поясах фермы в зонах примыкания раскосной решетки к верхним и нижним панелям полигональной фермы, в остальных зонах поясов ферм сетка не такая густая и составляет в среднем 10×100 мм.

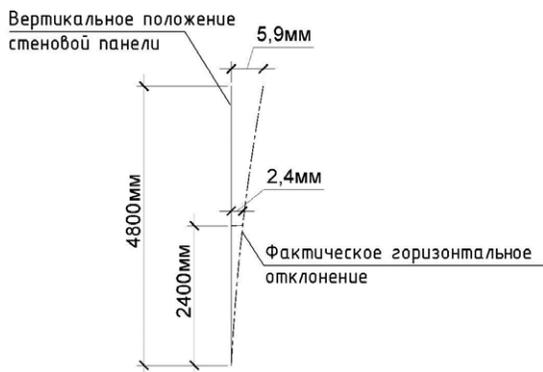


Рис. 7. Деформации стеновой панели, полученные в ходе эксперимента

Fig. 7. Experimentally obtained deformations of the wall panel

В численной модели были учтены следующие нагружения, выполненные при натурном эксперименте:

- действие комбинированной нагрузки: горизонтальной – 73 кг/м^2 и вертикальной – 320 кг/м^2 ;
- равномерно-распределенная вертикальная нагрузка – 400 кг/м^2 , приложенная по всей поверхности покрытия.

В результате выполненного расчета конструкции был выполнен сравнительный анализ экспериментальных распределений напряжений в элементах конструкции с расчетными значениями, полученными в численной модели.

В ходе анализа были рассмотрены характерные зоны конструкций, в частности опорный узел покрытия здания и участок стеновой секции.

Выборочные результаты численного моделирования и натурного эксперимента приведены ниже.

На рис. 7, 8 представлено сравнение перемещений при испытании и численном моделировании на действие комбинированной нагрузки: ветровой – 73 кг/м^2 и вертикальной снеговой – 320 кг/м^2 .

Качественный характер деформаций в обоих случаях одинаковый. При этом было выявлено, что перемещения в расчетной схеме значительно выше, чем при натурных испытаниях: фактическое горизонтальное отклонение составило порядка 6 мм в натурном эксперименте и 15 мм при численном моделировании.

Такое расхождение может быть обусловлено тем, что узел сопряжения несущих стеновых панелей с покрытием в реальной конструкции обладает определенной жесткостью из-за совместной работы дополнительных

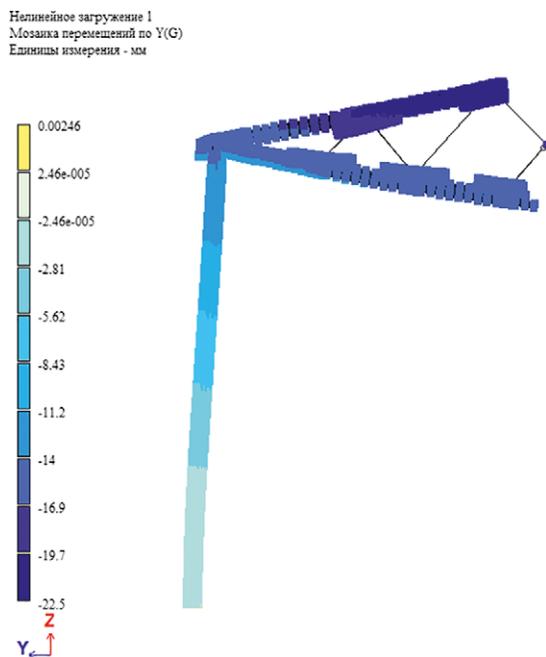


Рис. 8. Деформации стеновой панели по результатам численного моделирования

Fig. 8. Deformations of the wall panel according to numerical modeling results

стыковых узловых элементов. Также следует отметить, что граничные условия в численной модели не учитывают реальную жесткость заделки в зоне сопряжения стеновых панелей с фундаментной балкой.

На рис. 9 представлены напряжения в стеновой панели на расстоянии 2,8 м от уровня фундаментной балки, полученные в результате натурального эксперимента. Указанные напряжения соответствуют испытанию равномерно-распределенной вертикальной нагрузкой 400 кг/м², приложенной по всей поверхности покрытия.

На рис. 10 представлены напряжения в стеновой панели на расстоянии 2,8 м от уровня фундамента, полученные в результате численного моделирования. Полученные результаты имеют сходимость с экспериментальными данными 10–12 %.

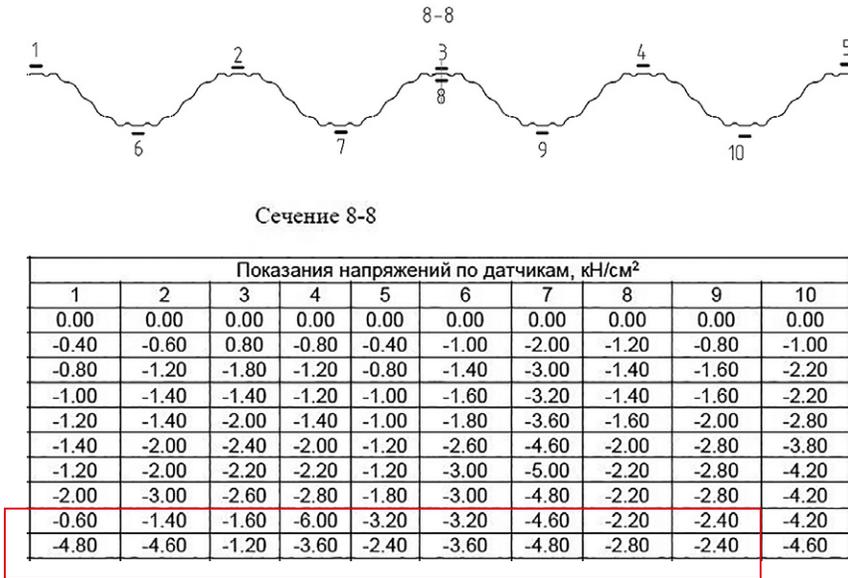


Рис. 9. Напряжения в стеновой панели, полученные в ходе эксперимента
Fig. 9. Experimentally obtained stresses in the wall panel

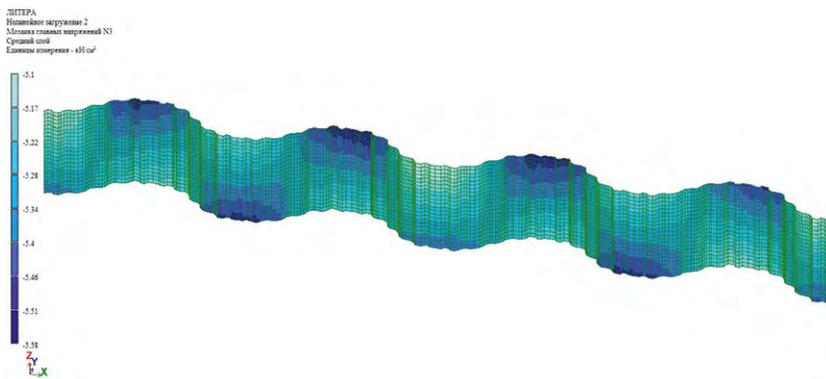
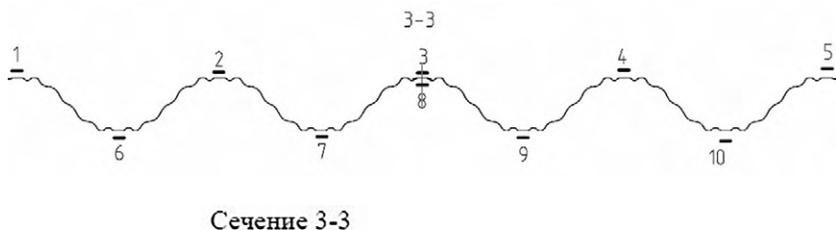


Рис. 10. Напряжения в стеновой панели по результатам численного моделирования
Fig. 10. Stresses in the wall panel according to numerical modeling results

На рис. 11, 12 представлены напряжения в кровельной панели в середине пролета сооружения. Характер и численные значения напряжений в элементах этой зоны также имеют удовлетворительную сходимость с результатами испытаний.



Показания напряжений по датчикам, кН/см²

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	-	0	0	0	0	0	0	0
-4.6	-4.8	-	-3.8	-2.4	1.4	-0.8	-3.4	-0.6	0.6
-5	-5.2	-	-3.6	-2.4	-1.4	-3	-4.2	-3	-2.4
-4.4	-5	-	-3.2	-2.2	-1	-2.8	-4	-2.8	-1.6
-4.2	-4.6	-	-3.2	-0.8	-1	-2.8	-2.8	-3	-2
-4.2	-4.6	-	-3.2	-2	-0.8	-2	-3.8	-2.4	-0.6
-5.8	-5.8	-	-4.6	-3.2	-4.2	-6.4	-5.6	-6.6	-5.2
-7	-9	-	-6.2	-5.2	-6.2	-8.2	-7.4	-8.8	-6.6
-7	-9.2	-	-6	-4.6	-6.4	-8.4	-7.4	-8.6	-6.6
-6.8	-9	-	-6.2	-6	-6.6	-8.6	-8.2	-9.4	-7.6
-7	-9.6	-	-7.2	-6.4	-7.2	-9.2	-8.4	-10	-7.6
-7	-10.4	-	-6.8	-6.4	-7.4	-9.4	-8.4	-10	-7.6
-6.4	-9	-	-6	-6	-7	-9.4	-8.2	-10	-7.4
-9	-12.6	-	-8.8	-8.4	-5.4	-8.4	-10.8	-9.4	-7.2
-9	-14.2	-	-9.4	-8.8	-7	-9.8	-12	-11.4	-9.2
-5.2	-10.8	-	-8.2	-8.4	-4.6	-7.8	-8.8	-9.2	-6.8

Рис. 11. Напряжения в кровельной панели, полученные в ходе эксперимента
Fig. 11. Experimentally obtained stresses in the roof panel

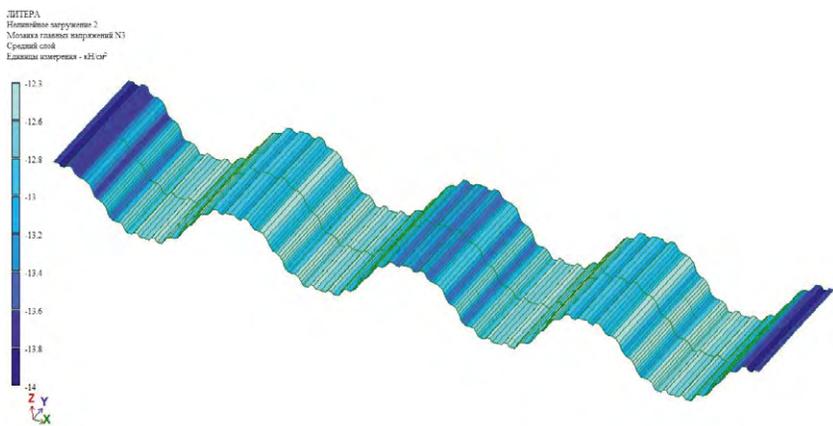


Рис. 12. Напряжения в кровельной панели по результатам численного моделирования
Fig. 12. Stresses in the roof panel according to numerical modeling results

С учетом представленных выше результатов испытаний можно заключить, что современные расчетные комплексы типа ЛИРА-САПР позволяют получать удовлетворительные результаты численных расчетов для сложных обсуждаемых моделей.

На основании проведенной работы получен большой объем экспериментальных данных, характеризующих характер работы элементов и узлов под нагрузкой, определен подход к моделированию и размерам конечных элементов для рассматриваемых профилей. Выполнен сравнительный анализ численных данных с результатами эксперимента, установлена их удовлетворительная сходимость.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки рекомендаций и инженерной методики расчета бескаркасного здания, определения фактической схемы работы узлов и элементов рассматриваемой конструкции.

Список литературы

1. *Ведяков И.И.* Новые типы бескаркасных зданий и перспективы их развития / И.И. Ведяков, Д.В. Соловьев, М.Ю. Арменский // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 10. – С. 27–29.
2. Развитие зданий из холодногнутых профилей / И.И. Ведяков, Д.В. Соловьев, А.И. Коваленко [и др.] // Вестник НИЦ Строительство. – 2018 – № 3. – 125–136 с.
3. *Прицкер А.Я.* Бескаркасные складчатые конструкции / А.Я. Прицкер, В.А. Аденский, М.С. Фридман. – Киев: Будівельник, 1991. – 88 с.
4. *Еремеев П.Г.* К проектированию бескаркасных конструкций арочных сводов из холодногнутых тонколистовых стальных профилей / П.Г. Еремеев, Д.Б. Киселев // Монтажные и спец. работы в стр.-ве. – 2004. – № 7. – С. 2–3.

Информация об авторах / Information about the authors

Иван Иванович Ведяков, д-р техн. наук, профессор, директор ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ivan I. Vedyakov, Dr. Sci. (Engineering), Prof., Director, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Дмитрий Валерьевич Соловьев*, канд. техн. наук, заведующий лабораторией большепролетных металлических конструкций и сертификации ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: DVSolov@yandex.ru
тел.: +7 (903) 107-03-47

Dmitrii V. Solovyev,* Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory, Laboratory of Large-Span Metal Structures and Certification, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: DVSolov@yandex.ru
tel.: +7 (903) 107-03-47

Алексей Владимирович Смагин, инженер лаборатории большепролетных металлических конструкций и сертификации ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Aleksei V. Smagin, Engineer, Laboratory of Large-Span Metal Structures and Certification, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author