

Исследование живучести мембранного покрытия большепролетного сооружения

УДК 69.04

Кравченко Г.М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: Galina.907@mail.ru

Труфанова Е.В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: El.Trufanova@mail.ru

Боженкова Ю.М.

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону); e-mail: bozhenkova-julia@yandex.ru

Сулопаров Д.А.

Магистрант, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», (г. Ростов-на-Дону); e-mail: denissusloparov181995@gmail.com

Статья получена: 13.03.2019. Рассмотрена: 20.03.2019. Одобрена: 30.03.2019. Опубликовано онлайн: 26.06.2019. ©РИОР

Аннотация. Выполнено исследование мембранного покрытия большепролетного сооружения. Рассмотрено пять стадий монтажа и эксплуатации покрытия. Учтена неравномерность приложения снеговой нагрузки в расчетной конечно-элементной модели сооружения. По результатам расчета, учитывающего этапность возведения, сделан вывод о правильности принятых конструктивных решений большепролетного покрытия. Исследовано два варианта аварийного воздействия на мембранное покрытие. Результаты расчетов показали, что опорный контур — ключевой элемент системы. Наиболее опасная аварийная ситуация — отказ узла стыковки опорного контура и фермы.

Отказ любых элементов, узлов, за исключением опорного контура, не приводит к пластическим деформациям в элементах покрытия.

Ключевые слова: большепролетное здание, живучесть, последовательность возведения, метод конечных элементов, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние.

В современной практике проектирования актуальна проблема безопасности при эксплуатации строительных конструкций. Выполнение требований живучести конструктивных систем зданий и сооружений становится основной задачей строительной отрасли. Понятие живуче-

STUDY OF A DURABILITY OF THE MEMBRANE LAYER OF A LONG-SPAN SUPERSTRUCTURE

Galina Kravchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: galina.907@mail.ru

Elena Trufanova

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: el.trufanova@mail.ru

Julia Bozhenkova

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: bozhenkova-julia@yandex.ru

Denis Susloparov

Master's Degree Student, Don State Technical University, Rostov-on-Don; e-mail: denissusloparov181995@gmail.com

Manuscript received: 13.03.2019. **Revised:** 20.03.2019. **Accepted:** 30.03.2019. **Published online:** 26.06.2019. ©РИОР

Abstract. The study of the membrane coating of large-span structures is carried out. Five stages of installation and operation of the coating are considered. The uneven snow pressure on the coating was calculated and applied to the finite element model of the structure. Based on the results, the authors also provide conclusions and summary about the considered structure. Two options of emergency cases have been investigated. The results showed that the support contour is a key element of the structure. The failure of any element, connection except of the support contour does not lead to plastic deformations in the coating.

Keywords: large-span building, survivability, erection sequence, finite element method, finite element model, stress-strain state.

сти определяется как свойство системы полностью или частично выполнять свое функциональное назначение при локальном отказе составляющих элементов конструктивной схемы [1].

В качестве объекта исследования выбрано большепролетное покрытие. Наиболее рациональный вариант покрытия — мембранное, совмещающее в себе главные достоинства оболочек: объединение несущей и ограждающей функций при низкой металлоемкости. Безопасность принятого конструктивного решения гарантируется высокой надежностью и живучестью мембранных покрытий. Покрытие опирается на железобетонные колонны, связанные монолитными плитами со стальным опорным контуром.

При исследовании живучести покрытия достаточно выполнить моделирование отказа «ключевых» или наиболее нагруженных элементов [2]. В исследуемом покрытии «ключевые» элементы представлены в виде опорного контура и угловых ферм. На живучесть оказывает влияние несущая способность наиболее нагруженных элементов. Уровень живучести конструкции как неповрежденного покрытия, так и после повреждения, оценивается индексом живучести I_{rob}^n :

$$I_{rob}^n = \frac{R_{\max,n} - R_{\text{факт},n}}{R_{\max,n=0}}, \quad (1)$$

где $R_{\max,n}$ — связность n -го уровня;
 $R_{\text{факт},n}$ — количество полученных повреждений на n -м этапе повреждений.

Выделены основные принципы и методики расчета мембранного покрытия на живучесть [3]:

- в дискретных конструктивных системах аварийное воздействие вызывается неумышленным отказом одного конструктивного элемента или узла;
- для моделирования отказа заменяют конечный элемент или узел граничными внутренними усилиями;
- в расчете учитываются нормативные постоянные и временные длительные нагружения;
- узлы сопряжений конечных элементов принимают равнопрочными основным элементом;

- сталь работает как упруго-пластичный материал, характеристики стали принимают с нормативными значениями;
- конструкция имеет высокую живучесть, когда разрушение какого-либо элемента и перераспределение усилий на другие элементы не приводит к разрушению конструкции. Условие неразрушения элементов:

$$\epsilon_{\max} \leq \gamma_i \cdot [\epsilon_{ult}], \quad (2)$$

где ϵ_{\max} — максимальная деформация в сечении элемента;

$[\epsilon_{ult}]$ — предельная деформация, при которой происходит разрыв;

γ_i — коэффициент запаса.

Нагружение системы выполняется с поэтапным увеличением нагрузки на каждой стадии монтажа [4]. Величина прироста нагрузки Δq_i на i -ой стадии нагружения определялась по формуле:

$$\Delta q_i = q \frac{3i^2 - 3i + 1}{N^3}, \quad (3)$$

где q — суммарная расчетная нагрузка на мембранное покрытие;

N — количество ступеней нагружения.

Для исследования живучести покрытия применен метод конечных элементов (МКЭ) [5]. Конечно-элементная модель каркаса сооружения создана в программном комплексе *LIRA 10.8* в виде пространственной плитно-стержневой системы (рис. 1).

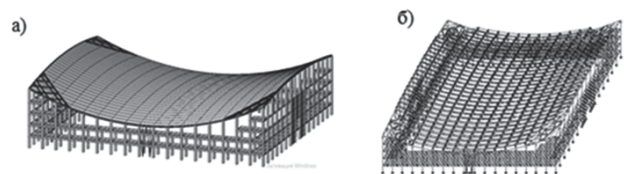


Рис. 1. Расчетная модель сооружения:
 а) 3D-вид; б) конечно-элементная модель

Для монолитного железобетонного каркаса приняты плиты перекрытия толщиной 220 мм из бетона класса В5, диафрагмы жесткости 300 мм, сечение колонн 800 × 800 мм из бетона класса В30. Опорный контур выполнен из стального короба, угловые фермы — металлические, мембранное покрытие из металлического листа толщиной 4 мм, монтажные элементы «посте-

ли» проектируются в виде стальных полос сечением 300×6 мм с шагом 3 м.

В расчетной модели учтен собственный вес элементов конструкций, снеговое и ветровое воздействия [6]. Расчет выполнен с учетом последовательности монтажа. Рассмотрены пять стадий: навеска монтажных элементов «постели»; раскладка листов мембраны; заварка мембраны; учет веса кровли; действие равномерной или неравномерной снеговой нагрузки.

Выполнен расчет с учетом этапности возведения и нагружения конструкций покрытия. На рис. 2 показаны перемещения опорного контура и мембраны с уточнением значений результатов расчета за стадию и относительно начального положения [7].

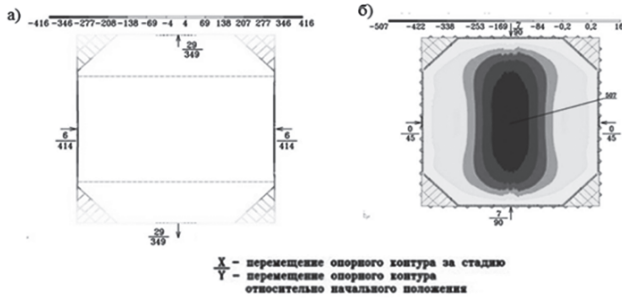


Рис. 2. Вертикальные перемещения:
а) опорного контура, стадия 1; б) опорного контура и мембраны, стадия 2

В результате расчета конструкций на третьей и четвертой стадиях получены главные напряжения в конструкциях покрытия (рис. 3).

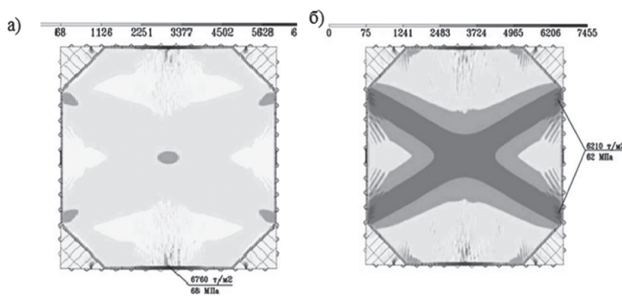


Рис. 3. Главные напряжения:
а) стадия 3; б) стадия 4

На четвертой стадии выполнен анализ прироста моментов в мембранном покрытии. Максимальный крутящий момент в мембране составил $531 \text{ тс}^*\text{м}$, в опорном контуре — $113 \text{ тс}^*\text{м}$ (рис. 4).

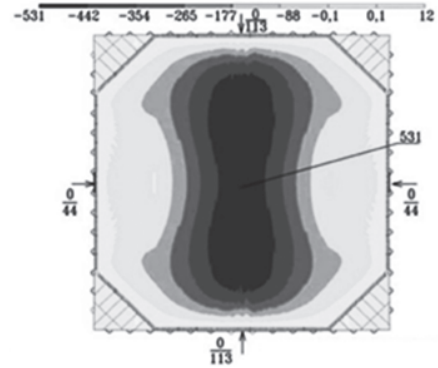


Рис. 4. Изополя крутящего момента на 4-й стадии этапности возведения

На пятой стадии расчета учтена работа конструкции покрытия при неравномерной снеговой нагрузке (рис. 5).

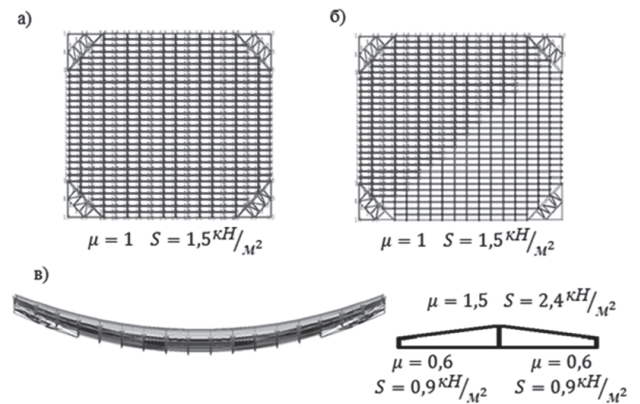


Рис. 5. Варианты учета снеговой нагрузки:
а) первый вариант; б) второй вариант; в) третий вариант

На рис. 6. показаны изополя крутящих моментов и главных напряжений при учете неравномерной снеговой нагрузки.

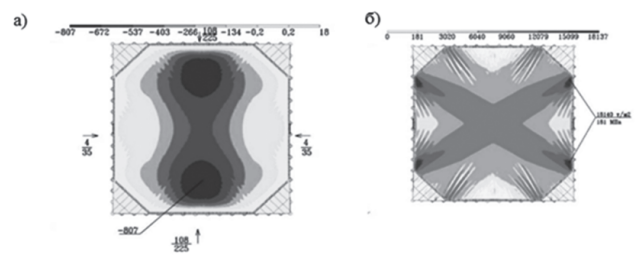


Рис. 6. Результаты расчета 5-го этапа монтажа:
а) крутящие моменты; б) главные напряжения

Анализ результатов расчета показал, что каркас здания способен воспринимать горизонтальные и вертикальные воздействия, обеспечивать устойчивость при свободном перемещении опорного контура в направлении, ортого-

нальном плоскости наружных стен. Мембрана активно работает в наиболее растянутом диагональном направлении. Наибольшие деформации мембраны возникают в зоне диагонального креста (рис. 7) [8].

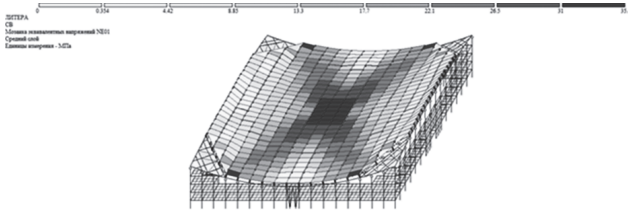


Рис. 7. Схема распределения главных напряжений

Выполнено моделирование двух аварийных ситуаций: разрез мембраны; обрушение узла сопряжения колонны и опорного контура [9]. Результаты расчета при первом варианте аварийной ситуации показаны на рис. 8.

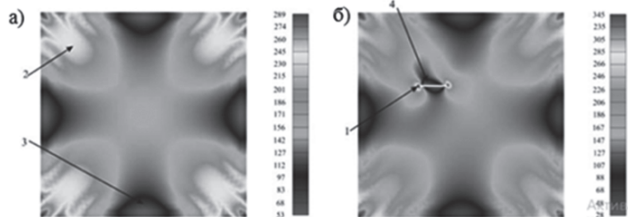


Рис. 8. Изополя приведенных напряжений:
а) до разреза; б) после разреза

Схема вертикальных перемещений полотна мембраны после отказа элемента опорного контура приведена на рис. 9.

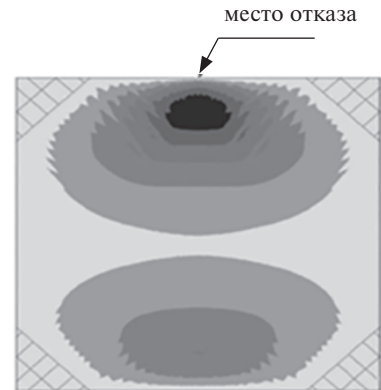


Рис. 9. Вертикальные перемещения полотна мембраны

При выводе одного узла из работы система не теряет геометрической неизменяемости, что говорит об изначально высоком потенциале живучести выбранной конструктивной схемы [10]. Исключение составит узел сопряжения опорного контура и угловых ферм, так как опорный контур одновременно является составляющей частью данных ферм, отказ элементов контура повлечет разрушение части покрытия, состоящего из фермы и элементов «постели». При этом оставшаяся часть покрытия сохраняет несущую способность конструкции, образуя две независимые системы.

Анализ результатов моделирования аварийных ситуаций показал, что мембранные покрытия обладают живучестью, обеспечивая надежность и безопасность конструктивных решений, и рекомендуются при проектировании большепролетных сооружений.

Литература

1. Кудишин Ю.И. К вопросу о живучести строительных конструкций [Текст] / Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот // Строительная механика и расчет сооружений. — 2008. — № 2. — С. 36–43.
2. Кудишин Ю.И. К оценке безопасности большепролетных мембранных покрытий [Текст] / Ю.И. Кудишин, Н.В. Канчели, Д.Ю. Дробот // Строительные материалы, оборудование, технологии 21-го века. — 2008. — № 5. — С. 30–33.
3. Еремеев П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях [Текст] / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2006. — № 2. — С. 23–27.
4. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений [Текст] / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2005. — № 1. — С. 5–12.
5. Агаханов Э.К., Агаханов М.К., Батманов Э.З. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout. MATEC Web of Conferences. 193, 03047 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303047/>
6. Агаханов Э.К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия [Текст] / Э.К. Агаханов [и др.] // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 8–17.
7. Канчели Н.В. Реализованные мембранные оболочки: расчет, проектирование, возведение [Текст] / Н.В. Канчели, П.А. Батов, Д.Ю. Дробот. — М.: АСВ, 2009. — 110 с.
8. Агаханов Э.К. О развитии комплексных методов решения задач механики деформируемого твердого тела [Текст] / Э.К. Агаханов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2013. — № 2. — С. 39–45.
9. Kravchenko G., Trufanova E., Kostenko D., Tsurikov S. Analysis of blast load on a reinforced concrete column in the time domain // International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City». — 2017. — С. 04019.

10. Агаханов Э.К. Регулирование параметров собственных колебаний пространственного каркаса здания [Текст] // Э.К. Агаханов, Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова //

Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2016. — № 3. — С. 8–15.

References

1. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. K voprosu o zhivuchesti stroitel'nykh konstrukcij [On the question of survivability of building structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij* [Construction mechanics and the calculation of structures]. 2008, I. 2, pp. 36–43.
2. Kudishin Yu.I., Kancheli N.V., Drobot D.Yu. K ocenke bezopasnosti bol'sheproletnykh membrannykh pokrytij [On the safety assessment of large-span membrane coatings]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii 21-go veka* [Construction materials, equipment, technologies of the 21st century]. 2008, I. 5, pp. 30–33.
3. Eremeev P.G. Predotvrashchenie lavinoobraznogo (progressivnyushchego) obrusheniya nesushchih konstrukcij unikal'nykh bol'sheproletnykh sooruzhenij pri avarijnykh vozdeystviyah [Avoiding an avalanche-like (progressive) collapse of the supporting structures of unique long-span structures under accidental effects]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij* [Structural mechanics and structure calculation]. 2006, I. 2, pp. 23–27.
4. Eremeev P.G. Osobennosti proektirovaniya unikal'nykh bol'sheproletnykh zdaniy i sooruzhenij [Features of the design of unique large-span buildings and structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij* [Structural mechanics and structure calculation]. 2005, I. 1, pp. 5–12.
5. Agahanov E.K., Agahanov M.K., Batmanov E.Z. The stress-strain state from its own weight in ground base with trapezoidal cutout. MATEC Web of Conferences. 193, 03047 (2018) Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819303047/>
6. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Osadchij E.V., Trufanova E.V. Raschet zdaniy slozhnoj geometricheskoy formy na vetrovye vozdeystviya [Calculation of buildings of complex geometric shape for wind effects]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2017, I. 2, pp. 8–17.
7. Kancheli N.V., Batov P.A., Drobot D.Yu. *Realizovannye membrannye obolochki: raschet, proektirovanie, vozvedenie* [Implemented membranes: calculation, design, construction]. Moscow: ASV Publ. 2009. 110 p.
8. Agahanov E.K. O razvitii kompleksnykh metodov resheniya zadach mekhaniki deformiruемого tverdogo tela [On the development of complex methods for solving problems of mechanics of a deformable solid]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2013, I. 2, pp. 39–45.
9. Kravchenko G., Trufanova E., Kostenko D., Tsurikov S. Analysis of blast load on a reinforced concrete column in the time domain // International Science Conference SPb-WOSCE-2016 \“SMART City\”. 2017. S. 04019.
10. Agahanov E.K., Kravchenko G.M., Trufanova E.V. Regulirovanie parametrov sobstvennykh kolebanij prostranstvennogo karkasa zdaniya [Regulation of parameters of natural oscillations of the spatial frame of the building]. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science]. 2016, I. 3, pp. 8–15.