

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.042

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-159-170

Оригинальная статья /Original Paper

Статический расчет несущей способности двухпоясной мембранно-стержневой системы с учетом воздухоопорного эффекта с применением численной процедуры Эйлера-Коши

А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, Россия

Резюме. Цель. Целью данного исследования является создание легкого, достаточно жесткого несущего покрытия, которое можно усиливать воздухоопорным эффектом при перегрузках во время форс-мажорных обстоятельств. Данные сооружения можно смонтировать в очень короткое время, как в условиях боевых действий, так и при стихийных бедствиях. **Метод.** Исследование выполнено в программном комплексе «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений шаговым методом с применением численной процедуры Эйлера – Коши» по методике статического расчета мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. **Результат.** Разработана методика расчета воздухоопорных двухпоясных мембранно-стержневых систем покрытий больших пролетов итерационным методом приращений параметров с применением на итерации МКЭ и численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Произведено технико-экономическое сравнение нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем двух типов при действии расчетных снеговых нагрузок. **Вывод.** В практике проектирования эффект усиления покрытия за счет воздухоопорного эффекта ориентировочно можно принимать равным трем. Применение воздухоопорного эффекта позволяет сэкономить значительные средства, иногда достигающие до 25% процентов от сметной стоимости сооружения за счет применения элементов конструкций меньшего сечения.

Ключевые слова: двухпоясные мембранно-стержневые системы, воздухоопорный эффект, численная процедура Эйлера – Коши, большепролетная мембранно-стержневая система, несущая способность

Для цитирования: А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Статический расчет несущей способности двухпоясной мембранно-стержневой системы с учетом воздухоопорного эффекта с применением численной процедуры Эйлера-Коши. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021;48(4):159-170. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-159-170

Static calculation of the bearing capacity of a two-pole membrane-rod system taking into account the air-bearing effect using the numerical Euler-Cauchy procedure

A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin

Yu.A. Gagarin Saratov State Technical University,
77 Politekhnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia

Abstract. Objective. The purpose of this study is to create a light, sufficiently rigid bearing coating, which can be strengthened by the air-supporting effect during overloads during force majeure. These structures can be erected in a very short time, both in combat conditions and during natural disasters. **Method.** The study was carried out in the software package "Program for calculating membrane-pneumatic structures by the step method using the numerical Euler-Cauchy procedure" according to the method of static calculation of membrane-pneumatic systems, taking into account non-linear factors. **Result.** A method for calculating air-supported double-belt membrane-rod systems for cover-

ing large spans by the iterative method of parameter increments using FEM and the Euler-Cauchy numerical procedure of the third order of accuracy has been developed. **Conclusion.** In design practice, the effect of strengthening the coating due to the air-supporting effect can approximately be taken equal to three. The use of the air-supported effect makes it possible to save significant funds, sometimes reaching up to 25% of the estimated cost of the structure due to the use of structural elements of a smaller section.

Keywords: two-belt membrane-rod systems, air support effect, Euler-Cauchy numerical procedure, long-span membrane-rod system, load-bearing capacity

For citation: A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Static calculation of the bearing capacity of a two-pole membrane-rod system taking into account the air-bearing effect using the numerical Euler-Cauchy procedure. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2021; 48(4):159-170. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-159-170

Введение. Авторы статьи раскрывают проблему усиления несущей способности большепролетной мембранно-стержневой системы за счет недорогих и эффективных способов с помощью мгновенных увеличений нагрузок на сооружение. Научных работ в таком направлении очень мало и они всегда вызывают большой интерес у исследователей. Данные системы авторы статьи рекомендуют применять для строительства в регионах с суровыми климатическими условиями, в основном для нужд МЧС и Министерства обороны. Судя по последним заявлениям министра обороны РФ Шойгу С.К. вопрос строительства нескольких городов в Сибири вопрос решенный, поэтому для развития современной инфраструктуры необходимо применять такие достаточно эффективные и быстровозводимые сооружения.

Данные сооружения могут быть универсального назначения и ими можно перекрывать достаточно большую площадь объектов (рис. 1).

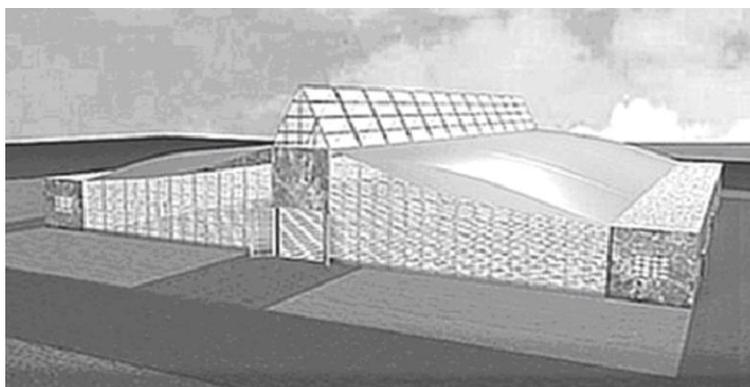


Рис. 1. Быстровозводимое мембранно-стержневое сооружение (составлено авторами)
Fig. 1. Prefabricated membrane-rod structure (compiled by the authors of the article)

Такие сооружения можно строить и на вечной мерзлоте, например в Арктике, где в настоящее время разворачивается Арктическая группировка российских войск. Данные сооружения достаточно утеплены, и в них можно легко организовать отопление с помощью автономных котельных на угле или любом другом топливе. Удобней всего для фундамента таких сооружений применять буронабивные сваи. Такие сваи показали себя очень хорошо при возведении зданий на вечной мерзлоте, и они достаточно экономичные [6,7,10]. В данных сооружениях можно размещать как личный состав военной группировки, так и необходимую технику, что очень удобно и экономично. Технология возведения таких быстровозводимых сооружений достаточно проста и известна. Фактически это сооружения заводского изготовления, которые привозятся на место, например транспортной авиацией, и здесь бригадой собираются уже на готовый фундамент. После возведения сооружения, требуется подключение его ко всем коммуникациям [3,9].

Удобно и относительно дешево применять такие сооружения для спортивных целей, например для плавательного бассейна. Данное сооружение может быть возведено достаточно быстро, все основные строительные конструкции и мембраны могут быть выполнены из алюминиевых конструкций, что очень удобно и дешево, так как такие конструкции гораздо меньше подвержены коррозии, чем стальные конструкции.

Известно, что сильно коррозия проявляет себя во влажной среде, а особенно если добавляется в воду хлорсодержащие вещества, поэтому очень важно защищать поверхность алюминия с помощью покраски и других мер. Детали крепления мембран к конструкциям, должны быть оцинкованным, а для фасада сооружения, обязательно нужно использовать детали из нержавеющей стали [4, 5].

Постановка задачи. Целью данного исследования является создание легкого, достаточно жесткого несущего покрытия, которое можно усиливать воздухоопорным эффектом при перегрузках во время форс-мажорных, т.е. чрезвычайных обстоятельств.

Методы исследования. Авторами статьи проведено численное исследование на ЭВМ несущей способности нелинейной двухпоясной мембранно-стержневой системы покрытия пролетом шестьдесят метров без усиления воздухоопорным эффектом и с усилением.

Для этого был использован программный комплекс «Программа расчета мембранно-пневматических сооружений шаговым методом с применением численной процедуры Эйлера – Коши».

В основе данного программного комплекса лежит методика статического расчета мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов, таких как показана на рис. 2.

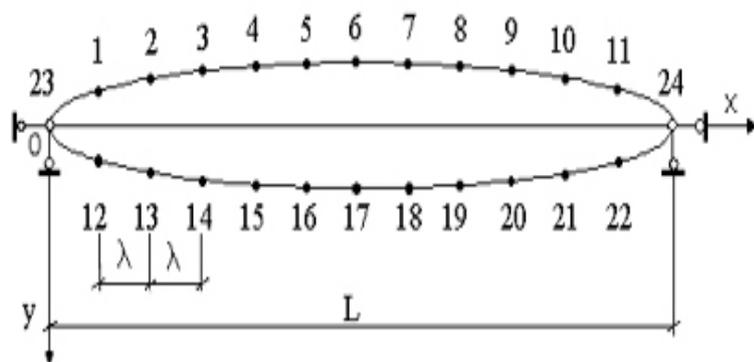


Рис. 2. Расчетная схема мембранно-пневматического сооружения*
*(составлено авторами статьи)

Fig 2. Calculation scheme of the membrane-pneumatic structure*
*(compiled by the authors of the article)

Для расчета применялся итерационный метод с численной процедурой Эйлера-Коши третьего порядка точности. Для расчета пневматических сооружений многими как отечественными авторами, так и зарубежными были применены шаговые методы с применением на шаге метода конечных элементов [8,14-20]. Впервые эти попытки в своей книге описал в 1983 году советский ученый В.В. Ермолов [1,2,11].

Далее авторами статьи было проведено определение максимальной несущей способности той же мембранно-стержневой системы, но уже в воздухоопорном режиме эксплуатации. Сопоставляемые системы рассчитаны на одни и те же нагрузки в соответствии с нормами проектирования капитальных покрытий

Приводим табл. 1 с результатами расчета несущей двухпоясной системы при отсутствии избыточного давления воздуха под покрытием (задача 1).

Несущая способность двухпоясной системы пролетом 60 метров при отсутствии избыточного давления воздуха во внутреннем помещении под покрытием, $p = 0$ па;

Толщина верхней мембраны 3 мм, толщина нижней мембраны 4 мм.

Таблица 1. Результаты статического расчета несущей двухпоясной мембранно-стержневой системы пролетом 60 метров *
Table 1. The results of the static calculation of the bearing two-belt membrane-rod system with a span of 60 meters*

№	Силовая нагрузка Power load	Узловая нагрузка Nodal load	Температура или осадка Temperature or precipitation	Прогиб в среднем узле 6 Deflection at the middle node 6
1	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	-	<u>0,009751 м</u>
2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	-	<u>0,076820 м</u>
3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_3 = 1373$ Н	1) 1500 Н 2) 11797,5Н 3) 1500 Н	-	<u>0,073577 м</u>
4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient tem- perature T1	<u>-0,049406 м</u>
5	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Температура/ Temperature T1, Осадка опор/ Draft supports VC	<u>-0,234022 м</u>
6	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	<u>0,209704 м</u>
П.1	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>0,035396 м</u>
ПП.2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>-0,102479 м</u>
ПП.3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient tem- perature T1	<u>0,018635 м</u>
ПП.4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	<u>0,142743 м</u>

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Далее было проведено численное исследование на этой же мембранно-стержневой системе, но с увеличенной толщиной верхней и нижней мембран (Задача 2).

Несущая способность двухпоясной системы пролетом 60 метров при отсутствии избыточного давления воздуха во внутреннем помещении под покрытием, $p = 0$ па.

Толщина верхней мембраны 4 мм, толщина нижней мембраны 6 мм

Таблица 2. Результаты статического расчета несущей двухпоясной мембранно-стержневой системы пролетом 60 метров с увеличенной толщиной мембран
Table 2. The results of the static calculation of the bearing two-belt membrane-rod system with a span of 60 meters with an increased thickness of the membranes

№	Силовая нагрузка Power load	Узловая нагрузка Nodal load	Температура или осадка Temperature or precipitation	Прогиб в среднем узле б Deflection at the middle node 6
1	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	-	<u>0,008641 м</u>
2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	-	<u>0,066816 м</u>
3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_3 = 1373$ Н	1) 1500 Н 2) 11797,5 Н 3) 1500 Н	-	<u>0,063643 м</u>
4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T_1	<u>-0,046305 м</u>
5	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Температура/ Temperature T_1 , Осадка опор/ Draft supports VC	<u>-0,235432 м</u>
6	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T_2	<u>0,199604 м</u>
П.1	Собственный вес/ dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>0,029396 м</u>
ПП.2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>-0,103368 м</u>
ПП.3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	11797,5 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T_1	<u>0,017535 м</u>
ПП.4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	1500 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T_2	<u>0,139742 м</u>

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Далее приводим табл. 3 с результатами расчета двухпоясной системы при наличии избыточного давления воздуха во внутреннем помещении под покрытием $P = 4300$ Па. Так называемая, задача с воздухоопорным эффектом, когда производится при больших нагрузках подкачка воздуха во внутреннее помещение сооружения (Задача 3). Несущая способность воздухоопорной системы при избыточном давлении воздуха во внутреннем помещении под покрытием $P = 4300$ Па

Таблица 3. Результаты статического расчета воздухоопорной двухпоясной мембранно-стержневой системы пролетом 60 метров с учетом воздухоопорного режима
Table 3. Results of the static calculation of an air-supported two-belt membrane-rod system with a span of 60 meters, taking into account the air-supported mode

№	Силовая нагрузка Power load	Узловая нагрузка Nodal load	Температура или осадка Temperature or precipitation	Прогиб в среднем узле б Deflection at the middle node 6
1	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	- 30750 Н	-	<u>-0,118663 м</u>
2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	- 20452,5 Н	-	<u>-0,132411 м</u>
3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_3 = 1373$ Н	1) -30750 Н 2) -20452,5 Н	-	<u>-0,135596 м</u>
4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	-30750 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T_1	<u>-0,260634 м</u>
5	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	-30750 Н	Температура/ Temperature T_1 , Осадка опор/ Draft supports VC	<u>-0,234704 м</u>
6	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	-20452,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T_2	<u>+0,063551 м</u>
П.4.1	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	- 30750 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>-0,173075 м</u>
П.4.2	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	-20452,5 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>-0,106802 м</u>
П.4.3	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	-20452,5 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T_1	<u>-0,193522 м</u>
П.4.4	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	-30750 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T_2	<u>-0,065672 м</u>

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

В задаче 4 была исследована под нагрузкой эта же система, но со стойками в четвертях и в середине пролета (табл. 4). Несущая способность воздухоопорной системы при избыточном давлении воздуха во внутреннем помещении под покрытием $P = 4300$ Па

Обсуждение результатов. Все расчеты в данном исследовании производились по разработанной авторами методике расчета воздухоопорных двухпоясных мембранно-стержневых систем покрытий больших пролетов итерационным методом приращений параметров с применением на итерации МКЭ и численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности [3,12,13].

Таблица 4. Результаты статического расчета воздухоопорной двухпоясной мембранно-стержневой системы пролетом 60 метров со стойками в середине пролета и четвертях
Table 4. Results of the static calculation of an air-supported two-belt membrane-rod system with a span of 60 meters with racks in the middle of the span and quarters

№	Силовая нагрузка Power load	Узловая нагрузка Nodal load	Температура или осадка Temperature or precipitation	Прогиб в среднем узле б Deflection at the middle node б
1	Собственный вес/ Dead load q1= 200 Н/кв. м	- 30750 Н	-	<u>- 0,102362 м</u>
2	Вес/ Weight q1, Снеговая нагрузка/ Snow load Q2 =1373 Н	- 20452,5 Н	-	<u>-0,093243 м</u>
3	Вес/ Weight q1, Снеговая нагрузка/ Snow load Q3 =1373 Н	1) -30750 Н 2)-20452,5 Н	-	<u>-0,085596 м</u>
4	Собственный вес/ Dead load q1= 200 Н/кв. м	-30750 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T1	<u>- 0,260634м</u>
5	Собственный вес/ Dead load q1= 200 Н/кв. м	-30750 Н	Температура/ Temperature T1, Осадка опор/ Draft supports VC	<u>- 0,234704 м</u>
6	Вес/ Weight q1, Снеговая нагрузка/ Snow load Q2 =1373 Н	-20452,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	<u>+ 0,053551 м</u>
П.4.1	Собственный вес/ Dead load q1= 200 Н/кв. м	- 30750 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>- 0,153075 м</u>
П.4.2	Вес/ Weight q1, Снеговая нагрузка/ Snow load Q2 =1373 Н	-20452,5 Н	Вертикальная осадка опор/ Vertical settlement of supports VC	<u>- 0,102602 м</u>
П.4.3	Вес/ Weight q1, Снеговая нагрузка/ Snow load Q2 =1373 Н	-20452,5 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T1	<u>- 0,174522 м</u>
П.4.4	Собственный вес/ Dead load q1= 200 Н/кв. м	-30750 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	<u>- 0,054672 м</u>

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Как видно по результатам расчета, геометрическая нелинейность исследуемой воздухоопорной двухпоясной системы также не превышает двух процентов. Прогибы капитального покрытия сооружения нормами России допускаются равными (1/200) пролета, в нии - (1/100) пролета.

Для выявления возможностей воздухоопорного эффекта в повышении несущей способности системы покрытия сооружения авторами рассмотрены задачи 5 (табл.5) и 6 с максимальными прогибами (табл. 6 и 7).

Таблица 5. Задача №5
Table 5. Task No. 5

Прогиб несущей двухпоясной системы/ Deflection of the bearing two-belt system				
	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	Узловая нагрузка/ Nodal load 1500 Н	Летняя температура среды/Summer ambient temperature T1	Прогиб/ Deflection -0,049406 м
Прогиб воздухоопорной двухпоясной системы при воздухоопорном режиме / Deflection of an air-supported two-belt system in air-supported mode				
	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	Узловая нагрузка/ Nodal load -30750 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T1	Прогиб/ Deflection -0,260634м
Суммарный прогиб проектируемой воздухоопорной двухпоясной системы/ The total deflection of the designed air-supported two-belt system				
	Собственный вес/ Dead load $q_1 = 200$ Н/кв. м	Узловая нагрузка/ Nodal load -30750 Н	Летняя температура среды/ Summer ambient temperature T1	Прогиб/ Deflection -0,310000 м

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Прогиб в середине пролета в летнее время при сложении нагрузок.

Заметим, что в задаче 5 суммарный прогиб воздухоопорной двухпоясной системы возникает от действия удвоенного собственного веса, удвоенной летней температуры и действующего на систему воздухоопорного эффекта с избыточным давлением воздуха во внутреннем помещении, равным 4300 Па.

Прогиб в середине пролета в зимнее время при сложении нагрузок.

Таблица 6. Задача №6
Table 6. Task No. 6

Прогиб несущей двухпоясной системы/ Deflection of the bearing two-belt system				
	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	Узловая нагрузка/ Nodal load 11797,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	Прогиб/ Deflection 0,209704 м
Прогиб воздухоопорной двухпоясной системы/ Deflection of the air-supported two-belt system				
	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	Узловая нагрузка/ Nodal load -20452,5 Н	Зимняя температура среды/ Winter environment temperature T2	Прогиб/ Deflection 0,065507 м

Учитывая малую геометрическую нелинейность исследуемой системы (менее двух процентов), и полученные результаты расчета задачи 6, сложим все нагрузки этой задачи и будем считать, что эти суммарные нагрузки приложены к исследуемой воздухоопорной системе.

В результате получим суммарный прогиб воздухоопорной двухпоясной системы (табл.7).

Таблица 7. Задача 6
Table 7. Task No. 6

Суммарный прогиб проектируемой воздухоопорной двухпоясной системы/ The total deflection of the designed air-supported two-belt system				
	Вес/ Weight q_1 , Снеговая нагрузка/ Snow load $Q_2 = 1373$ Н	Узловая нагрузка/ Nodal load -20452,5 Н	Зимняя температура сре- ды/ Winter environment temperature T2	Прогиб/ Deflection +0,275000 м

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

В Задаче 6 суммарный прогиб воздухоопорной двухпоясной системы возникает от действия удвоенного собственного веса, удвоенной зимней температуры и действующего на систему воздухоопорного эффекта с избыточным давлением воздуха во внутреннем помещении, равным 4300 Па.

Обсуждение результатов. Авторы рассмотрели наиболее опасные (при невыгодном сочетании нагрузок в летнее и зимнее время) случаи возможного нагружения системы и установили, что прогиб воздухоопорной системы, составляющий $-0,31$ м (или $+0,275$ м), не превышает допустимый по второму предельному состоянию прогиб, указанный в нормах проектирования прогиб, составляющий $L/200 = 0,45$ м.

Таким образом, воздухоопорная система по прогибам позволяет значительно увеличить расчетную нагрузку, по сравнению с обычной двухпоясной системой.

По результатам проведенного исследования проведенного на линзообразных мембранно-пневматических системах, усиленных расположенными вдоль пролета стойками, соединяющими мембраны можно сделать вывод: трех стоек, расположенных в четвертях и в середине пролета вполне достаточно.

В этом случае между стойками, то есть на четверти пролета, мембрана работает за счет избыточного давления воздуха. Главное то, что стойка делает одинаковыми прогибы нижней и верхней мембран системы в районе расположения стойки, что существенно уменьшает кинематические смещения поясов относительно друг друга. Общее же повышение жесткости пневматической системы повышает сопротивляемость и живучесть линзообразного покрытия при больших нагрузках, что особенно важно для районов с частыми ураганами и тайфунами.

Исследования показали, что при наличии стоек наблюдается эффект значительного усиления жесткости и несущей способности линзообразных мембранно-пневматических систем при больших пролетах. Расстояние между стойками вдоль здания можно при проектировании корректировать и тем самым, регулировать эффект усиления системы.

Выявлено также, что усиление мембранно-пневматических систем при больших пролетах за счет изгибной жесткости монтажных арок нецелесообразно из-за малого эффекта. Чем больше пролет, тем меньше влияние монтажной арки. Обычно эти арки свариваются из двух швеллеров и влияние их на материалоемкость невелико. Часто монтаж мембранных линз производят в накаченном состоянии без установки арок.

Авторами статьи произведено технико-экономическое сравнение нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем двух типов при действии расчетных снеговых нагрузок.

Первая из сопоставляемых систем – это гибкая линзообразная мембранно-пневматической система классического типа, когда между двумя выпуклыми мембранами закачан воздух. Эта система проста конструктивно, работает на распределенные снеговые нагрузки, рациональна и к настоящему времени недостаточно изучена учеными.

Для этих систем достаточно электроэнергии от аккумуляторов, им не нужны шлюзы, они надежны в военное время (при автоматных очередях и более сильных обстрелах), быстро возводятся и демонтируются, и в настоящее время применяются в вооруженных силах стран НАТО, наряду с широко распространенными воздухоопорными системами. Вторая система это такая же система, но роль воздуха выполняют стойки, которые соединяют две мембраны в единое целое.

Несмотря на увеличение стоимости покрытия сооружения за счет установки этих стоек, происходит значительное увеличение несущей способности данного перекрытия, оно становится значительно жестче.

Далее приведем результаты анализа работы, то есть возникающего избыточного давления и прогибов нагруженной снегом верхней мембраны нелинейного покрытия с гибкими линзообразными мембранно-пневматическими системами классического типа и нелинейного покрытия с линзообразными мембранно-пневматическими системами, усиленными в пролете тремя стойками, связывающими мембраны.

Результаты исследования сопоставляемых линзообразных мембранно-пневматических систем при действии расчетных снеговых нагрузок приведены в табл. 8 и табл. 9.

Таблица 8. Характеристики линзообразных мембранно-пневматических систем при действии расчетных снеговых нагрузок
Table 8. Characteristics of lenticular membrane-pneumatic systems under the action of calculated snow loads

Снеговая нагрузка/ Snow load $q_{1/2}$ на полу- пролете при числе шагов $n=2$ on a half-span with the number of steps	Мембранно- пневматическая линза с тремя стойками, соединяющими мембраны Membrane-pneumatic three post lens connecting membranes	Мембранно- пневматическая линза классического типа Membrane-pneumatic lens of classical type	Расхождение результатов Divergence of results
Избыточное давление в линзе /Excessive pressure in the lens PN (Па)	84,62 Па	373,94 Па	В 4,42 раза больше/ larger (на 342%)
Вертикальный прогиб/ Vertical deflection V_6 (м)	0,113000 м	0,410000 м	В 3,63 раза больше/ larger (на 263%)

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Таблица 9. Характеристики линзообразных мембранно-пневматических систем при действии расчетных снеговых нагрузок
Table 9. Characteristics of lenticular membrane-pneumatic systems under the action of calculated snow loads

Снеговая нагрузка/ Snow load q_l по всему пролету при числе шагов $N=2$ Throughout the span with the number of steps	Мембранно- пневматическая линза с тремя стойками, соединяющими мембраны Membrane-pneumatic three post lens connecting membranes	Мембранно- пневматическая линза классического типа Membrane-pneumatic lens of classical type	Расхождение результатов Divergence of results
Избыточное давление в линзе/ Excessive pres- sure in the lens PN (Па)	196,46 Па	423,21 Па	В 2,15 раза больше/ larger (на 115%)
Вертикальный прогиб/ Vertical deflection V_6 (м)	0,037362 м	0,047141 м	В 1,26 раза больше/ larger (на 26%)

*Составлено авторами/ Compiled by the authors

Вывод. При подведении итогов данного исследования можно сказать, что применение воздухоопорного эффекта при значительных повышениях нагрузки на большепролетную систему, например при ураганном ветре или сильном и продолжительном снегопаде очень эффективно. Усилие в несущем (нижнем) поясе проектируемой воздухоопорной системы вычисляем, учитывая его величину на конечной стадии монтажа: $1033740 + 245826,9 - 200140,5 = 1033740 + 45686,4 = 1079426,4$ Н.

Видим, что усилия в верхнем и нижнем поясах запроектированной воздухоопорной системы изменились незначительно (на четыре процента) и о перегрузке речи не идет. Из приведенных расчетов видно, что при наличии воздухоопорного эффекта система может быть нагружена более чем в три раза, но при этом прогибы ее остаются в пределах нормы, а пояса из работы не выключаются. Усиление несущей способности линзообразного покрытия за счет избыточного давления воздуха во внутреннем помещении сооружения оказалось высокоэффективным. Учитывая, что нелинейность невелика, можно быстро определить, насколько несущая способность покрытия увеличилась. Так, при силовых нагрузках, действующих вниз, система

была запроектирована на общую нагрузку, равную $200 \text{ Н} + 1373 \text{ Н} = 1573 \text{ Н}$. Но воздухоопорная нагрузка действует вверх и составляет 4300 Н . Следовательно, к исследуемой воздухоопорной системе можно приложить расчетную нагрузку, которая в $(4300/1573)$ раза, то есть в 2,7 раз больше первоначальной. Заметим, что и по второму предельному состоянию нормативную нагрузку, равную 100 Н/кв. м , можно увеличить в $(4300/1181)$ раз, то есть в 3,6 раза.

В качестве рекомендаций проектировщикам, работающим с данным классом большепролетных сооружений, можно сказать, что в практике проектирования эффект усиления покрытия за счет воздухоопорного эффекта ориентировочно можно принимать равным трем. Применение воздухоопорного эффекта нужно только при экстремальных ситуациях, которые могут возникнуть за весь срок эксплуатации сооружения один-два раза, но его применение позволяет сэкономить значительные средства, иногда достигающие двадцати-двадцати пяти процентов от сметной стоимости сооружения за счет применения элементов конструкций меньшего сечения. Что касается усиления данных линзообразных мембранно-пневматических систем стойками, то это дает значительный эффект, так как система становится жестче, прогибы становятся меньше примерно в три раза, не нужно тратить деньги на подкачку воздуха во внутренние помещения сооружения для создания воздухоопорного эффекта, но внесение данных конструктивных изменений увеличивает стоимость данного сооружения. Увеличение толщины мембран данного линзообразного мембранно-пневматического сооружения практически ничего дает, прогибы сокращаются незначительно, но стоимость сооружения значительно увеличивается из-за большей материалоемкости мембран и увеличения веса покрытия.

Авторы надеются, что данные проведенного исследования позволят увеличить практику применения большепролетных двухпоясных мембранно-стержневых систем для создания инфраструктуры, как в городах РФ, так и в Арктике и других местах с суровыми климатическими условиями. Данные сооружения позволяют создать в условиях мирового экономического кризиса инфраструктуру для достойной жизни людей, как в мирное время, так и в условиях природных и военных катаклизмов.

Библиографический список:

1. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон. М.: Стройиздат, 1982. 447с.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер. – М.: МИР, 1984. – 428 с.
3. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров в теории расчета нелинейных мембранно-пневматических систем с учетом упругой работы воздуха / А. Ю. Ким; М-во образования и науки Рос. Федерации, Саратов. гос. техн. ун-т. - Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. 186с.
4. Овчинников И.Г. О задачах оптимального проектирования конструкций, подвергающихся воздействию агрессивных сред [Текст] // Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1988. № 9. С. 17 – 22.
5. Петров, В.В. Расчёт элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / В.В. Петров, И.Г. Овчинников, Ю.М. Шихов. – Саратов: Саратов. ун-т, 1987. – 288 с.
6. Погонин А.О. Принципы формирования автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера: Автореф. дис. ... канд. арх. – Москва, 2010. – 30 с.
7. Поросенкова К.В., Пучков М.В. Проектирование нового города в экстремальных условиях крайнего севера // Архитектон: известия вузов, приложение к № 34, 2011 / [Электронный ресурс]. – Режим доступа
8. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений / В.Д. Райзер. – Москва: Издательство АСВ, 2018. – 396 с.
9. Теличенко В.И., Терентьев О.М., Лapidус А.А. Технология возведения зданий и сооружений для студ. строит. спец. – М.: Высш. шк., 2006. – 446 с
10. Уткин В.С. Расчет несущей способности буронабивных висячих свай и подбор длины свай по коэффициенту запаса // Транспортные сооружения, 2017 №2, <https://t-s.today/PDF/02TS217.pdf> (доступ свободный)
11. Ermolov V.V., Bird W.W., Bubner, W. (1983). Pneumatic Building Structures. Moscow: Stroyizdat, 439 p.
12. Voznsenskiy S.B., Ermolov V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Gostroya USSR.
13. Geiger David (1975). Low-profile air structures in the USA. Building Research and Practice, March-April, p. 80-87.
14. Krivoshapko, S.N., Galishnikova, V.V. (2015). Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 476 p.
15. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Т 456.
16. Дзагов А.М., Сидорчук В.Ф. Геотехнические аспекты устройства и работы под нагрузкой буронабивных свай в просадочных грунтах // Геотехника, 2012. – N 6.– С. 4-21.

17. Иванова Т.В., Альберт И.У., Кауфман Б.Д., Шульман С.Г. Несущая способность свай по критерию прочности материала сваи или грунта // Инженерно-строительный журнал, 2016 – No7 (67). – С. 3-12.
18. Мангушев Р.А., Готман А.Л., Знаменский В.В. И др. Сваи и свайные фундаменты: конструкции, проектирование, технологии / М.: АСВ, 2015. – 314 с.
19. Метелюк Н.С., Шишко Г.Ф., Соловьев А.Б. и др. Сваи и свайные фундаменты. Изд-во К.: Будивельник, 1977. 256 с.
20. Интернет портал: «Экоустойчивая архитектура: большепролётные светопрозрачные здания и сооружения». Режим доступа: <http://blog.dp.ru/post/4699/>

References:

1. Bate K. Numerical methods of analysis and the finite element method. Vilson. M.: *Stroyizdat*, 1982; 447. (In Russ)
2. Gallager R. Gallagher, Finite Element Method. Fundamentals. M.: *MIR*, 1984; 428. (In Russ)
3. Kim A.Yu. Iterative method of parameter increments in the theory of calculation of nonlinear membrane-pneumatic systems taking into account the elastic work of air. Ministry of Education and Science Ros. Federation, Sarat. state tech. un-t. - Saratov: Sarat. state tech. un-t-2005; 186. (In Russ)
4. Ovchinnikov I.G. On the problems of optimal design of structures exposed to aggressive media. [Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura] *Proceedings of universities. Construction and architecture*. 1988; 9: 17 – 22. (In Russ)
5. Petrov V.V. Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment [Tekst] / V.V. Petrov, I.G. Ovchinnikov Yu.M. Shixov. Saratov: Sarat. un-t, 1987; 288. (In Russ)
6. Pogonin A.O. Principles for the formation of autonomous residential buildings in extreme natural conditions: Avtoref. dis. ... kand. arx. Moskva, 2010; 30. (In Russ)
7. Porosenkova K.V., Puchkov M.V. Designing a new city in the extreme conditions of the Far North. [Arhitekton: izvestiya vuzov, prilozhenie] *Architecton: news of universities, supplement*. 2011; 34 [E'lektronny`j resurs].
8. Rajzer V.D. Probabilistic methods in the analysis of reliability and survivability of structures. Moscow: *DIA Publishing House*, 2018; 396. (In Russ)
9. Telichenko V.I., Terent'ev O.M., Lapidus A.A. Lapidus A.A. Technology of construction of buildings and structures for students. builds. specialist. *Higher. School*. 2006; 446. (In Russ)
10. Utkin V.S. Calculation of the bearing capacity of bored hanging piles and selection of the pile length according to the safety factor. [Transportny`e sooruzheniya] *Transport facilities*. 2017; 2, <https://t-s.today/PDF/02TS217.pdf> (dostup svobodny`j) (In Russ)
11. Ermolov V.V., Bird W.W., Bubner W. Pneumatic Building Structures. Moscow: *Stroyizdat*. 1983; 439. (In Russ)
12. Vozsenskiy S.B., Ermolov V.V. Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Gosstroya USSR, 1975. (In Russ)
13. Geiger David. Low-profile air structures in the USA. *Building Research and Practice*, March-April, 1975; 80-87.
14. Krivoschapko S.N., Galishnikova V.V. Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 2015; 476. (In Russ)
15. Travush V.I. Contemporary Digital Technologies in Construction Part 1: About Mathematical (Numerical) Modelling / V.I. Travush, A.M. Belostosky, P.A. Akimov. – DOI 10.1088/1757-899X/456/1/012029 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 456.
16. Dzagov A.M., Sidorchuk V.F. Geotechnical aspects of the device and work under load of bored piles in subsidence soils. [Geotekhnika] *Geotechnical*. 2012; 6: 4-21. (In Russ)
17. Ivanova T.V., Al'bert I.U., Kaufman B.D., Shul'man S.G. Bearing capacity of hanging piles according to the criterion of the strength of the pile material or soil [Inzhenerno-stroitel'ny`j zhurnal] *Civil Engineering Journal*. 2016 ;7 (67): 3-12. (In Russ)
18. Mangushev R.A., Gotman A.L., Znamenskij V.V. Piles and pile foundations: structures, design, technologies. M.: ASV, 2015; 314. (In Russ)
19. Metelyuk N.S., Shishko G.F., Solov'ev A.B. Piles and pile foundations. Izd-vo K.: *Budivel'nik*, 1977; 256.
20. Internet portal: Eco-sustainable architecture: large-span translucent buildings and structures. Rezhim dostupa: <http://blog.dp.ru/post/4699/>

Сведения об авторах:

Ким Алексей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; sberbanksp@yandex.ru

Миша Фрикович Амоян, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; ezid-007@ya.ru

Виктор Евгеньевич Хапилин, аспирант, кафедра строительных материалов, конструкций и технологий; khapil-in2010@yandex.ru

Information about authors:

Aleksey Yu.Kim, Dr.Sci. (Eng), Prof., Department of Building Materials, Structures and Technologies; sberbanksp@yandex.ru

Misha F. Amoyan, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; ezid-007@ya.ru

Viktor E. Khapilin, Postgraduate Student, Department of Building Materials, Structures and Technologies; khapil-in2010@yandex.ru; orcid:0000-0002-0690-3601

Конфликт интересов/Conflict of interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 01.10.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 30.10.2021.

Принята в печать/ Accepted for publication 02.11.2021.