

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.042

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Оригинальная статья /Original Paper

Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом

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 обоснование методики статического расчета легких покрытий сооружений больших пролетов с линзообразными мембранно-пневматическими линзами, включающими стойки в отдельных точках пролета, шагово-итерационным методом приращений параметров. **Метод.** Исследование предполагает поэтапное применение метода конечных элементов (МКЭ), универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши с учетом геометрической нелинейности систем и физической нелинейности упругой работы воздуха в линзах и с учетом последствия избыточного давления воздуха. **Результат.** Производится сравнение по жесткости и несущей способности мембранно-пневматических линз, усиленных отдельными стойками, с соответствующими гибкими мембранно-пневматическими линзами классического типа. **Вывод.** 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. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы значительно меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки первого и второго предельного состояния.

Ключевые слова: шагово - итерационный метод приращений параметров, усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши, учет геометрической и физической нелинейности упругой свойств воздуха в пневмополости, мембранно-пневматические линзы классического типа

Для цитирования: А.Ю. Ким, М.Ф. Амоян, В.Е.Хапилин. Численное исследование влияния отдельных стоек в линзах на работу нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем шаговым методом. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(1):122-132. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method

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

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

Abstract. Objective. The purpose of this study is to substantiate the methodology for static calculation of light coatings for large-span structures with lenticular membrane-pneumatic lenses, including racks at individual points of the span, using the step-iterative method of parameter increments. **Method.** The study involves the phased application of the finite element method (FEM), the universal equation of state of gas and the improved Euler-Cauchy numerical procedure, taking into account the geometric nonlinearity of systems and the physical nonlinearity of the elastic work of air in lenses and

taking into account the aftereffect of excess air pressure. Result. A comparison is made in terms of rigidity and load-bearing capacity of membrane-pneumatic lenses, reinforced with individual posts, with the corresponding flexible membrane-pneumatic lenses of the classical type. **Conclusion.** In the presence of racks, the effect of a significant increase in the rigidity and bearing capacity of lenticular membrane-pneumatic systems is observed for large spans. The distance between the posts along the building can be adjusted during the design and thereby regulate the effect of strengthening the system. The maximum deflections of the lenticular-shaped membrane-pneumatic system reinforced with struts are much less than the maximum deflections of the lenticular membrane-pneumatic system of the classical type under the action of the calculated snow load of the first and second limit states.

Keywords: step - an iterative method of parameter increments, an improved numerical Euler-Cauchy procedure, taking into account the geometric and physical nonlinearity of the elastic properties of air in the pneumatic cavity, membrane-pneumatic lenses of the classical type

For citation: A.Yu. Kim, M.F. Amoyan, V.E. Khapilin. Numerical study of the effect of individual racks in lenses on the operation of nonlinear lenticular membrane-pneumatic systems by the step method. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2022; 49(1):122-132. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-1-122-132

Введение. В Саратове строительство спортивных объектов началось в начале шестидесятых годов прошлого столетия, были построены и несколько стадионов и плавательный бассейн и несколько других спортивных объектов [1-3]. Второй этап массового строительства спортивных сооружений начался в современной капиталистической России в конце девяностых годов прошлого столетия. За последние двадцать лет в Саратовской области построено более двадцати ФОК, практически они есть во всех районах города Саратова и крупных городах региона.

Постановка задачи. Авторы данного исследования предлагают возводить большепролетные линзообразные мембранно-пневматические сооружения универсального назначения. Данные сооружения монтируются на площадке из конструкций заводского изготовления и на готовом фундаменте, могут быть полностью возведены за два месяца, еще несколько месяцев потребуется на оснащение данного сооружения специальным оборудованием в зависимости от его назначения. В таких сооружениях легко можно разместить легкоатлетический манеж, ледовый каток, бадминтонный центр и другие спортивные объекты. Эти сооружения являются экономическими эффективными, архитектурно-выразительными и могут украсить собой тот уголок населенного пункта, где они размещены (рис. 1.)



Рис. 1. Большепролетное мембранно-пневматическое сооружение
(составлено авторами)

Fig 1. Long-span membrane-pneumatic structure
(Compiled by the authors)

Однако данные сооружения достаточно сложные при расчете, требуются учесть не только традиционные нагрузки на сооружения, но и пневматические нагрузки, т.е. утечку и подкачку воздуха внутри герметичных пневмолинз.

Ранее расчет линзообразной мембранно-пневматической системы сводился к условному расчету предельного состояния ее несущего и напрягающего поясов в отдельности. Авторы данной статьи рассчитали пневматическую систему в целом, т.е. с учетом упругих свойств воздуха пневмолинзы и изменения давления воздуха в ней от совокупности всех параметров. Такой расчет позволяет очень точно описать реальную работу системы при действии как статических, так и динамических нагрузок. С учетом нелинейных факторов, так как данные системы сугубо нелинейные, геометрическая нелинейность в них в некоторых случаях достигает до 40 % [4, 6, 7].

Методы исследования. В начале двадцать первого века был разработан метод расчета нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем средних пролетов (до 24 м) с учетом упругих свойств воздуха [4,5]. При этом развитием известного метода приращений параметров первого или второго порядка точности явился итерационный метод приращений параметров с поэтапным применением на шаге численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности. Этот метод включает в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений параметров первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в с-том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}\left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2}\right), \text{ где } 2 \leq c \leq 4. \quad (1)$$

Приращения функций накоплений Δy_n осредняются численной процедурой Рунге-Кутты в пределах шага при $c = 2$. При $c = 4$ расчетная формула (1) итерационного метода приращений параметров дает на шаге результаты третьего порядка точности.

Геометрическую нелинейность системы удавалось полностью учесть, так как она достигала (10-15) %, но невозможно было достаточно точно учесть физическую нелинейность, обусловленную нелинейно-упругими свойствами воздуха и составляющую (30-40)% и более [4,5].

Требовалось более точно смоделировать процесс изменения избыточного давления воздуха в линзе под действием нагрузок. Для этого нужен был такой итерационный процесс, который рассматривал бы физическую нелинейность пневмолинзы как процесс последовательного изменения избыточного давления воздуха в герметичной полости линзы и учитывал бы различное влияние его на расчетные параметры системы.

Если для учета геометрической нелинейности пневматической линзы в итерационном методе Эйлера-Коши достаточно было 4 итерации, то для учета физической нелинейности работы воздуха и описания процесса изменения параметров пневмолинзы при нагружении, как показали исследования, иногда требуется 25-30 итераций и более. Сходимость итераций численной процедуры Эйлера-Коши доказана проф. Коши, но скорость итерационного процесса может быть различной.

К функциям накоплений относятся температурные, кинематические и пневматические нагрузки. Но только пневматические нагрузки относятся к нагрузкам, которые являются следящими и после приложения на итерации шага нагружения системы обладают сильным по сравнению с другими нагрузками последствием, т.е. последующей релаксацией системы, напряженной дополнительным давлением воздуха [6,11].

Авторы статьи совершенствуют прежде разработанную методику, развивая её для расчета геометрически и физически нелинейных линзообразных мембранно-пневматических систем

покрытий больших пролетов итерационным методом приращений параметров с поэтапным применением метода конечных элементов, универсального уравнения состояния газа и усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности и с учетом последствий [4].

По новой методике расчета проведено численное исследование на ЭВМ новых линзообразных мембранно-пневматических систем, усиленных стойками, соединяющими мембраны в отдельных точках [5, 19].

Полученные результаты расчета сопоставлены с результатами расчета гибких линзообразных систем классического типа, дана оценка влияния геометрической нелинейности систем и физической нелинейности работы воздуха герметичных полостей покрытия, показана целесообразность расчета линзообразных покрытий при двух шагах нагружения и большом числе итераций, учитывающих последствие избыточного давления воздуха.

Результаты численного исследования усиленных стойками линзообразных мембранно-пневматических систем покрытий сооружений позволили определить несущую способность и материалоемкость покрытия повышенной жесткости и оценить эффективность новых пневматических систем.

Для точного учета «последствия» на каждой итерации авторы применяют формулу, корректирующую величину прикладываемой к системе внешней пневматической нагрузки:

$$P^{(c+1)} = P^{(c)} - \Delta P^{(c)}. \quad (2)$$

Здесь под P подразумевается пневматическая нагрузка, возникающая при накачке воздуха в пневматическую линзу или при утечке воздуха из линзы. Отметим, что по формуле (3) на текущей итерации производится корректировка пневматической нагрузки P , которая будет действовать на следующей итерации. Применяемое при этом правило знаков: при увеличении давления в линзе приращение давления считается положительным, а при убывании - отрицательным.

Если приращение пневматической нагрузки положительное, то в процессе последствия избыточное давление в линзе уменьшается. Но поскольку величина задаваемой пневматической нагрузки P на каждой итерации должна быть величиной постоянной и равной заданной проектировщиком величине пневматической нагрузки, то знак в корректирующей формуле (2) должен быть «минус». Нагрузка P возрастет на $\Delta P^{(c)}$, останется постоянной и равной $P^{(c+1)} = P - \Delta P^{(c)}$.

Численная процедура предлагаемого варианта итерационного метода приращений параметров с поэтапным применением усовершенствованной численной процедуры Эйлера-Коши третьего порядка точности, будет включать в себя следующую последовательность операций:

1. Решение задачи в первом приближении, т.е. методом приращений первого порядка точности с применением формулы Эйлера:

$$\Delta Z_{nv}^{(1)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu}(x_{n-1,\mu}, y_{n-1}).$$

2. Решение задачи в s -том приближении по формуле:

$$\Delta Z_{nv}^{(c)} = \sum_{\mu=1}^{\mu=\mu} \Delta x_{n\mu} \cdot A'_{v\mu} \left(x_{n-1,\mu} + \frac{\Delta x_{n\mu}}{2}, y_{n-1} + \frac{\Delta y_n^{(c-1)}}{2} \right), \text{ где } 2 \leq c \leq C_k. \quad (3)$$

$$P^{(c+1)} = P - \Delta P^{(c)}.$$

Здесь C_k – конечная итерация, на которой процесс сходимости решения по достижении заданной точности завершается.

При этом хорда, отражающая собой процесс нагружения системы, при увеличении числа итераций постепенно наклоняется к истинной кривой решения задачи и при достижении заданной точности на последней итерации расчет завершается. Этот процесс, при достаточно большом начальном избыточном давлении воздуха в линзе большого пролета, сходится довольно быстро, что можно видеть по результатам, выведенным на печать в конце каждой итерации

расчета.

К функциям накоплений, влияющим на жесткость системы, относятся температурные, кинематические и пневматические нагрузки. Но только пневматические нагрузки относятся к нагрузкам, которые являются следящими и после приложения нагрузки на итерации шага нагружения системы обладают первичным последствием, т.е. следующей за нагружением системы релаксацией системы, напряженной, созданным пневматической нагрузкой избыточным давлением воздуха. Первичному последствию были посвящены работы некоторых отечественных и зарубежных исследователей [3- 5, 8, 10, 12 -18].

Обсуждение результатов. По разработанной методике статического расчета авторами проведено численное исследование на ЭВМ новых линзообразных мембранно-пневматических систем, усиленных отдельными стойками. Результаты расчета сопоставлены с результатами расчета гибких линзообразных систем классического типа. Результаты численного исследования усиленных стойками линзообразных мембранно-пневматических систем позволили определить несущую способность и материалоемкость покрытия, оценить эффективность новых систем и учесть вторичное последствие приращения избыточного давления воздуха, вызванное статическими традиционными нагрузками, в частности силовыми нагрузками. Для точного учета вторичного «последствия» на каждой итерации производится столько итераций на шаге, сколько требуется их до полного учета последствия и окончательного уравнивания системы [4].

Приведем пример расчета линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия пролетом 60 м на действие распределенной нагрузки QL с учетом последствия избыточного давления воздуха. Стальная мембранно-пневматическая линза, усиленная тремя стойками, соединяющими мембраны, в покрытии пролетом 60 м

Два шага нагружения. Исследуемая система, показана на рис. 1. Расчетная схема показана на рис. 2.

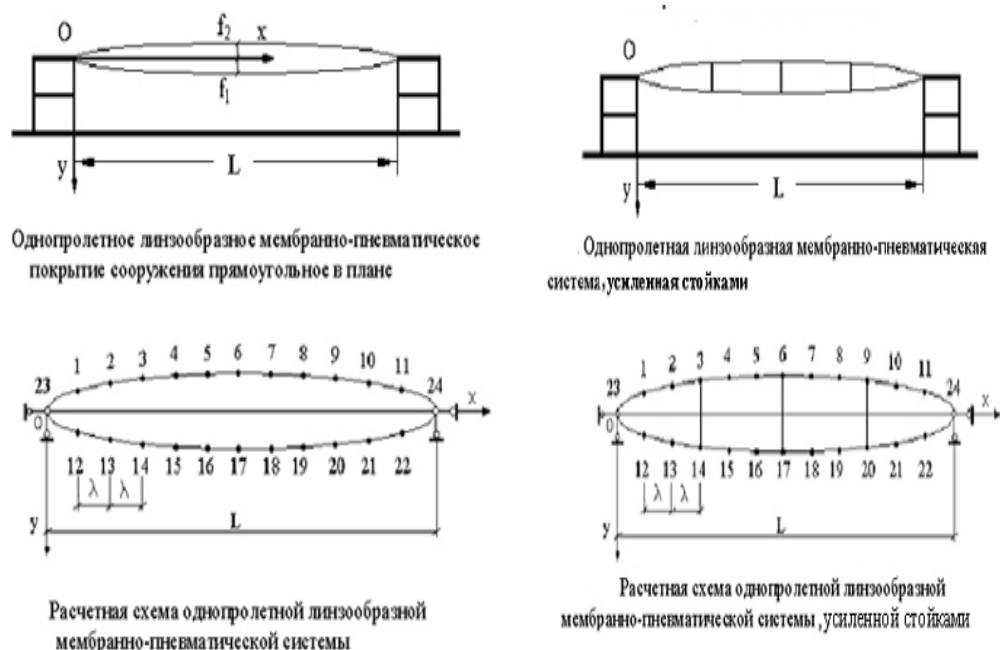


Рис. 2. Покрытия сооружений прямоугольные в плане и соответствующие расчетные схемы (составлено авторами)

Fig. 2. Coverings of structures are rectangular in plan and the corresponding design schemes (compiled by the authors)

Исходные данные:

Число шагов $NK = 2$. Число итераций на шаге $СК = 25$

Признак наличия подкачки-утечки воздуха $P = 0$

Признак силового воздействия $Q = 1$

Массив, описывающий топологию системы An array describing the topology of the system

1	23	2	0	0	0
2	1	3	0	0	0
3	2	4	0	0	14
4	3	5	0	0	0
5	4	6	0	0	0
6	5	7	0	0	17
7	6	8	0	0	0
8	7	9	0	0	0
9	8	10	0	0	20
10	9	11	0	0	0
11	10	24	0	0	0
12	0	0	23	13	0
13	0	0	12	14	0
14	0	0	13	15	3
15	0	0	14	16	0
16	0	0	15	17	0
17	0	0	16	18	6
18	0	0	17	19	0
19	0	0	18	2	0
20	0	0	19	21	9
21	0	0	20	22	0
22	0	0	21	24	0
23	0	1	0	12	0
24	11	0	22	0	0

Сосредоточенные силы $q(i)$, действующие на систему

Concentrated forces $q(i)$ acting on the system

$Q(2) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(4) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(6) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(8) = 6865 \text{ (H)}$

$Q(10) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(12) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(14) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(16) = 6865 \text{ (H)}$

$Q(18) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(20) = 6865 \text{ (H)}$ $Q(22) = 6865 \text{ (H)}$

Избыточное давление в линзе на монтаже DP1(SL) = 3000

Погонная нагрузка на пояса от собственного веса $Q_1, Q_2 = 320, 240 \text{ (H)}$

Результаты счета на шаге N=2

Счет на шаге N = 2 CI = 24

Объем полости линзы на стадии эксплуатации $V_2 = 233.6251054855499$

Приращение объема полости линзы $DV = -.5560195144501279$

Приращение давления в линзе $PN(SL\%) = 196.4609$

Избыточное давление в линзе $PL(SL\%) = 3196.461$

Пневматические нагрузки на стадии эксплуатации

Pneumatic loads during operation

$PQN(1) = -139.8179840687308\#$

$PQN(2) = -985.0972326195661\#$

$PQN(3) = -111.2989760959658\#$

$PQN(4) = -983.1708636436597\#$

 $PQN(41) = 168.6066377272205\#$

$PQN(42) = 977.6754307044139\#$

$PQN(43) = 170.8573251302887\#$

$PQN(44) = 982.7088918785794\#$

Суммарные перемещения на шаге N=2 Total displacements at step N=2

Горизонтальные перемещения Horizontal movements	Вертикальные перемещения Vertical movements
U(1)= 1.204654670684335D-03	V(1)= 1.116122910798657D-02
U(2)= 1.747320853559926D-03	V(2)= 2.034522947117062D-02
U(3)= 1.746661883460063D-03	V(3)= 2.740386616338132D-02
U(4)= 1.423176651948843D-03	V(4)= 3.329878213981299D-02
U(5)= 7.873263312209724D-04	V(5)= 3.668310621603459D-02
U(6)= 5.810780888212486D-17	V(6)= 3.743615011636488D-02
U(7)=-7.873263312208454D-04	V(7)= 3.668310621603395D-02
U(8)=-1.423176651948696D-03	V(8)= 3.329878213981195D-02
U(9)=-1.746661883459906D-03	V(9)= 2.740386616338021D-02
U(10)=-1.747320853559792D-03	V(10)= 2.034522947116975D-02
U(11)=-1.204654670684257D-03	V(11)= 1.116122910798611D-02
U(12)= 1.114977937880524D-03	V(12)=-3.219415792142701D-03
U(13)= 2.529551790898961D-04	V(13)= 5.898803355633871D-03
U(14)=-1.781463228942868D-03	V(14)= 2.738518550495047D-02
U(15)=-5.552616017036223D-04	V(15)= 1.856404961498471D-02
U(16)=-2.202710657108793D-04	V(16)= 2.190168921508464D-02
U(17)=-6.164704605509447D-17	V(17)= 3.741304063088534D-02
U(18)= 2.202710657107488D-04	V(18)= 2.190168921508425D-02
U(19)= 5.552616017034742D-04	V(19)= 1.856404961498397D-02
U(20)= 1.781463228942689D-03	V(20)= 2.738518550494936D-02
U(21)=-2.529551790900408D-04	V(21)= 5.898803355633036D-03
U(22)=-1.114977937880629D-03	V(22)=-3.219415792143274D-03
U(23)= 0	V(23)= 0
U(24)= 0	V(24)= 0

Продольные усилия NAB (A, R) на стадии эксплуатации Longitudinal forces NAB (A, R) during operation

380301.9	378300.5	0	0	0
378300.5	376724.8	0	0	0
376724.8	375548.5	0	0	-5493.496
375548.5	374778.9	0	0	0
374778.9	374395.8	0	0	0
374395.8	374395.8	0	0	-5493.496
374395.8	374778.9	0	0	0
374778.9	375548.5	0	0	0
375548.5	376724.8	0	0	-5493.496
376724.8	378300.5	0	0	0
378300.5	380301.9	0	0	0
0	0	570125.3	567247.9	0
0	0	567247.9	564952.7	0
0	0	564952.7	562785.4	-5493.496
0	0	562785.4	561682.7	0
0	0	561682.7	561110.8	0
0	0	561110.8	561110.8	-5493.496
0	0	561110.8	561682.7	0
0	0	561682.7	562785.4	0
0	0	562785.4	564952.7	-5493.496
0	0	564952.7	567247.9	0
0	0	567247.9	570125.3	0
0	380301.9	0	570125.3	0
380301.9 0	570125.3	0	0	0

Далее приводим результаты шагово-итерационного расчета нелинейной линзообразной мембранно-пневматической системы покрытия с линзой, усиленной тремя стойками, соединяющими мембраны. Расчет с одним и двумя шагами нагружения явились главными для расчета исследуемых покрытий. Кроме того, результаты расчетов той же линзообразной системы с числом шагов от 3 до 10 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет линзообразной системы с числом шагов от 3 до 10
Table 1. Calculation of a lenticular system with the number of steps from 3 to 10

Число шагов нагрузки Number of load steps	Приращение избыточного давления Overpressure increment	Прогиб верхнего пояса в середине пролета Deflection of the upper belt in mid-span
N=1	PN=142,9 Па	V=0,038157 м
N=2	PN=196,5 Па	V=0,037436 м
N=3	PN=193,1 Па	V=0,036840 м
N=4	PN=179,9 Па	V=0,036343 м
N=5	PN=165,0 Па	V=0,035925 м
N=6	PN=150,7 Па	V=0,035570 м
N=7	PN=137,8 Па	V=0,035267 м
N=8	PN=126,3 Па	V=0,035008 м
N=9	PN=116,1 Па	V=0,034785 м
N=10	PN=107,2 Па	V=0,034592 м

На основе результатов решения задач 1 - 10 построен график (рис. 3), показывающий изменение по шагам избыточного давления в замкнутой полости линзы, усиленной стойками. Зависимость величины избыточного давления в линзе от числа шагов, на которые разбивается нагрузка, является нелинейной, что выражает кривая OGFBE.

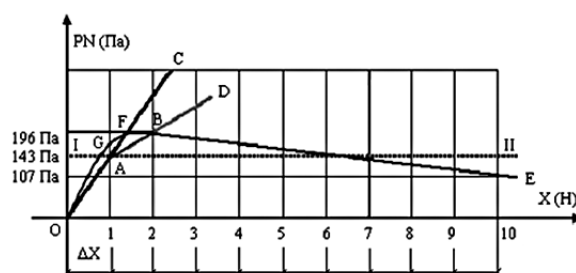


Рис. 3. График результатов вычисления расчетных величин избыточного давления воздуха в линзе, усиленной стойками (составлено авторами)

Fig. 3. Graph of the results of calculating the calculated values of excess air pressure in a lens reinforced with racks (Compiled by the authors)

Рассмотрим график с различным числом шагов нагружения системы, построенный по результатам, полученным для избыточного давления PN. Один шаг нагружения: точка А - результат решения задачи на шаге O1 по оси OX. Это решение получено на линейном участке OG. Два шага нагружения: точка В - результат решения задачи на шагах O1 и 12 вдоль оси OX. Это решения получено на линейных участках OA и ABD.

Кривая расчетных величин избыточного давления воздуха в линзе (кривая OGFBE), показывает, что максимальное давление воздуха получено при двухшаговом нагружении системы (точка В). Избыточное давление в точке В превышает избыточное давление в точке А, полученное при одношаговом нагружении на 37 %, так как $(196,4609 \text{ Па}) / (142,9228 \text{ Па}) = 1,37$. Максимальный прогиб системы получен при одношаговом нагружении. Он равен $V=0,038157 \text{ м}$, и превышает прогиб системы при двухшаговом нагружении всего на 2% так как $V=0,038157 \text{ м} / 0,037436 \text{ м} = 1,02$. Следовательно, для определения расчетных прогибов системы и расчетного избыточного давления воздуха в линзе, необходимо рассчитывать мембранно-пневматическую систему на действие расчетной нагрузки при одном и двух шагах нагружения.

Вычисляемые расчетные величины при решении задач с числом шагов нагружения системы более двух (эти результаты отражает снижающаяся прямая ВЕ) меньше максимальной величины избыточного давления воздуха в линзе. Отметим, что при расчете мембранно-пневматических систем необходимо учитывать не только первичное последствие от пневматических нагрузок, но и вторичное последствие от традиционных нагрузок. При расчете на пневматические нагрузки (подкачку или утечку воздуха) первичное последствие необходимо учитывать всегда, поскольку влияние его при расчете пневматической системы классического типа составляет (30 – 40) % [4]. Но проведенное исследование показало, что первичное последствие в линзообразной мембранно-пневматической системе с линзой, усиленной стойками, составило от заданного приращения избыточного давления воздуха 12,1%, что в три раза меньше той величины, которая получена для линзообразных мембранно-пневматических систем классического типа. Следовательно, наличие стоек уменьшает не только расчетные прогибы системы от расчетных снеговых нагрузок, но и последствие от нагружения систем избыточным давлением воздуха.

Авторами исследуются линзообразные мембранно-пневматические системы, усиленные расположенными вдоль пролета стойками, соединяющими мембраны. Обычно трех стоек, расположенных в четвертях и в середине пролета достаточно. В этом случае между стойками, то есть на четверти пролета, мембрана работает за счет избыточного давления воздуха. Каждая 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, тайфунами и цунами.

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. Результаты избыточного давления и прогибов нагруженной снегом верхней мембраны нелинейного покрытия линзообразной мембранно-пневматической системы, усиленной в пролете тремя стойками, связывающими верхнюю и нижнюю мембраны и обычную пневмолинзу, без усиления.

Вывод. Результаты исследования сопоставляемых систем при действии расчетных снеговых нагрузок приведены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 2. Действия расчетных снеговых нагрузок

Table 2. Actions of design snow loads

Снеговая нагрузка $q_{1/2}$ на полупролете при $n=2$ Snow load $q_{1/2}$ on a half-span with $n=2$	Линза с тремя стойками, в пролете Lens with three racks, in flight	Линза классического типа Lens classical type	Расхождение результатов Discrepancy results
Приращение давления PN Pressure increment PN	84,62 Па	373,94 Па	в 4,42 раз больше (на 342%) 4,42 times more (342%)
Вертикальный прогиб V_6 Vertical deflection V_6	0,113000 м	0,410000 м	в 3,63 раз больше (на 263%) 3,63 times more (by 263%)

Полученные результаты исследования работы при действии расчетных снеговых нагрузок усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы при сопоставлении её с гибкой линзообразной мембранно-пневматической системой классического типа позволяют сделать следующие выводы:

Таблица 3. Действия расчетных снеговых нагрузок
Table 3. Actions of design snow loads

Снеговая нагрузка на всем пролете q_l при $n=2$ Snow load on the entire span q_l at $n=2$	Линза с тремя стойками, в пролете Lens with three racks, in flight	Линза классического типа Lens classical type	Расхождение результатов Discrepancy results
Приращение давления PN Pressure increment PN	196,46 Па	423,21 Па	в 2,15 раз больше (на 115%) 2,15 times more (115%)
Вертикальный прогиб V_6 Vertical deflection V_6	0,037362 м	0,047141 м	в 1,26 раз больше (на 26%) 1,26 times more (26%)

1. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы в 3,6 раза меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки второго предельного состояния.
2. Максимальные прогибы усиленной стойками линзообразной мембранно-пневматической системы в 1,3 раза меньше максимальных прогибов линзообразной мембранно-пневматической системы классического типа при действии расчетной снеговой нагрузки первого предельного состояния.
3. Приращение избыточного давления в линзообразной системе, усиленной стойками, в 2,15 раз меньше приращения избыточного давления в линзообразной гибкой системе классического типа.
4. Площади поперечных сечений в линзообразной системе, усиленной стойками такие же, как в покрытии с линзой классического типа, то есть толщина несущего пояса 4 мм, толщина напрягающего пояса 3 мм. В расчетах же на прочность толщина мембран потребовалась 3 мм и 2 мм соответственно.

Учитывая, что элементы усиления мембраны обычно устанавливают по длине покрытия на расстоянии друг от друга не менее 6 метров, их материалоемкость составит незначительную часть от материалоемкости мембранного покрытия классического типа.

Библиографический список:

1. Ермолов В.В., Бэрд У.У., Бубнер У. и др. Пневматические строительные конструкции. М.: Стройиздат, 1983. 439.
2. Вознесенский С. Б., Ермолов В. В. Проектирование пневматических конструкций в СССР и за рубежом. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1975.
3. Грек Е.В. Пневматические конструкции и продуктивизм в архитектурном дизайне// vselim.com, 2014.
4. Ким А.Ю. Расчет мембранно-пневматических систем с учетом нелинейных факторов. Книга 2. Дискретные расчетные схемы. Саратов. гос. аграр. ун-т, Саратов, 2000. 129 с. Деп. в ВИНТИ 29.05.00 № 1547 - В2000.
5. Полников С.В. Расчет нелинейных линзообразных мембранно-пневматических покрытий сооружений больших пролетов итерационным методом приращений параметров с усовершенствованной численной процедурой// Научное обозрение. - 2017. - № 19. - С. 35-41
6. Voznsenskiy S.B., Ermolov, V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Gosstroya USSR.
7. Geiger, David (1975). Low-profile air structures in the USA. Building Research and Practice, March-April, p. 80-87.
8. Jens G. Pohl. Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures – Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes. – California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California: 2014. – 406 p.
9. Krivoschapko, S.N., Galishnikova, V.V. Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 2015; 476.
10. 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. –
11. Уткин В.С. Расчет несущей способности буронабивных свай и подбор длины свай по коэффициенту запаса // Транспортные сооружения, 2017 №2, <https://t-s.today/PDF/02TS217.pdf> (доступ свободный)
12. 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.
13. Погонин А.О. Принципы формирования автономных жилых зданий в экстремальных условиях природного характера: Автореф. дис. ... канд. арх. – Москва, 2010. – 30 с.

14. 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
15. Райзер В.Д. Вероятностные методы в анализе надежности и живучести сооружений. Москва: Издательство АСВ, 2018. – 396 с.
16. Теличенко В.И., Терентьев О.М., Липидус А.А. Технология возведения зданий и сооружений для студ. строит. спец. – М.: Высш. шк., 2006. – 446 с
17. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
18. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы М.: МИР, 1984. – 428 с.
19. Ким А.Ю. Итерационный метод приращений параметров в теории расчета нелинейных мембранно-пневматических систем с учетом упругой работы воздуха. М-во образования и науки Рос. Федерации, Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 186с.

References:

1. Ermolov V.V., Be'rd U.U., Bubner U.. Pnevmaticheskie stroitel'ny'e konstrukcii. M.: Strojizdat, 1983; 439. (In Russ)
2. Voznesenskij S. B., Ermolov V. V. Proektirovanie pnevmaticheskix konstrukcij v SSSR i za rubezhom. – M.: CINIS Goss-troya SSSR, 1975. (In Russ)
3. Grek Ev. Pneumatic structures and productivity in architectural design // vselim.com, 2014. (In Russ)
4. Kim A.Yu. Calculation of membrane-pneumatic systems taking into account non-linear factors. Book 2. Discrete calculation schemes. Sarat. state agrarian un-t, Saratov, 2000; 129. Dep. v VINITI 29.05.00 № 1547 - V2000. (In Russ)
5. Polnikov S.V. Calculation of Nonlinear Lenticular Membrane-Pneumatic Coatings of Large-Span Structures by the Iterative Method of Parameter Increments with an Improved Numerical Procedure [Nauchnoe obozrenie] *Scientific review*. 2017;19: 35-41(In Russ)
6. Vozsenskiy, S.B., Ermolov, V.V. (1975). Design of Pneumatic Structures in the USSR and Abroad. Moscow: TzINIS Goss-troya USSR. (In Russ)
7. Geiger David. Low-profile air structures in the USA. *Building Research and Practice*, 1975; March-April: 80-87.
8. Jens G. Pohl. Multi-Story Air-Supported and Fluid-Inflated Building Structures – Revised Edition: Concept, Design Principles, and Prototypes. *California Polytechnic State University, San Luis Obispo, California*: 2014; 406.
9. Krivoshapko S.N., Galishnikova V.V. Architectural-and-Building Structures: Text Book, Moscow: Izd-vo "URAIT", 2015; 476 p.
10. 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: 56.
11. 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> (In Russ)
12. Petrov V.V. Calculation of structural elements interacting with an aggressive environment [Text] / V.V. Petrov, I.G. Ovchinnikov, Yu.M. Shikhov. *Saratov: Sarat. un-t*, 1987; 288. (In Russ)
13. Pogonin A.O. Principles for the formation of autonomous residential buildings in extreme natural conditions: Abstract of the thesis. dis. ... cand. arch. Moskva, 2010; 30. (In Russ)
14. Porosenkova K.V., Puchkov M.V. Designing a new city in the extreme conditions of the Far North. [Arxitekton: izvestiya vuzov, prilozhenie] *Architecton: news of universities, application*, 2011; 34 [E'lektronny'j resurs]. – Rezhim dostupa (In Russ)
15. Rajzer V.D. Probabilistic methods in the analysis of the reliability and survivability of structures. Moscow *Izdatel'stvo ASV*, 2018; 396. (In Russ)
16. Telichenko V.I., Terent'ev O.M., Lapidus A.A. Technology of construction of buildings and structures for students. builds. specialist. 2006; 446. (In Russ)
17. Bate K., Vilson E. Numerical methods of analysis and finite element method M.: *Strojizdat*, 1982;447. (In Russ)
18. Gallager R. Method of finite elements. Fundamentals .M.: *MIR*, 1984; 428. (In Russ)
19. Kim A.Yu. An iterative method of parameter increments in the theory of calculation of nonlinear membrane-pneumatic systems, taking into account the elastic work of air. Federation, Sarat. state tech. un-t. 2005; 186. (In Russ)

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; khapilin2010@yandex.ru orcid:0000-0002-0690-3601

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; khapilin2010@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 01.02.2022.

Одобрена после рецензирования / Revised 26.02.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 26.02.2022.