

УДК 624.011.78

А. В. Чесноков

РАБОТА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК НА ПРЯМОУГОЛЬНОМ ПЛАНЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕРАВНОМЕРНЫХ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК

Рассматривается работа пневматических оболочек, прямоугольных в плане, подверженных действию внешних неравномерных нагрузок, состоящих из симметричной и обратно-симметричных частей. Предлагается усовершенствованная методика поиска геометрических параметров фрагментов оболочек, основанная на применении метода наименьших квадратов. Рассматривается методика учета физически нелинейных свойств материала оболочек и методика поиска внутреннего избыточного давления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: воздушнонаполненные оболочки, пневмоэлементы, неравномерные обратно-симметричные нагрузки, физическая нелинейность.

The work of rectangular pneumatic envelopes is considered. The envelopes are subjected to non-uniform external loadings, which consist of symmetric and inverse-symmetric parts. The author offer the improved technique for obtaining geometrical parameters of envelope fragments. It is based on the method of least squares. Techniques for taking into account physical non-linear properties of envelope material and for calculating the value of internal air pressure are considered.

Key words: air-inflated envelopes, pneumatic cushions, non-uniform inverse-symmetric loadings, physical nonlinearity.

Пневматические оболочки состоят из полимерных пленок (фрагментов), образующих полости, наполненные воздухом под давлением. Их основные преимущества: легкость, повышенные тепло- и звукоизолирующие свойства, проницаемость для видимого света и ультрафиолетового излучения. Пневматические оболочки, применяемые в качестве элементов покрытий, улучшают выразительность здания и способствуют разнообразию его архитектурных форм [1]. Вместе с тем, они обладают рядом особенностей: повышенная деформативность, проявление физически нелинейных свойств материала, изменение внутреннего давления воздуха из-за деформации полимерной пленки и вследствие температурных колебаний [2].

Внешняя вертикальная нагрузка S , действующая на пневматическую оболочку, зачастую распределяется по сложному закону. Наиболее значительные деформации возникают под действием неравномерных нагрузок. При этом на отдельных участках загруженного фрагмента оболочки возникают пере- и недонапряжения, влекущие повреждение полимерной пленки, либо образование складок. Серьезной проблемой является образование на поверхности покрытия так называемых «линз», или локальных прогибов, препятствующих удалению атмосферных осадков и влекущих дальнейший рост нагрузок.

В данной работе принято, что внешняя нагрузка S , в целом действующая неравномерно на фрагмент пневматической оболочки, может быть представлена в виде компонентов S_i , $i=1...4$, равномерно загружающих четыре сектора (четверти) поверхности, разделенной осями симметрии (рис. 1, а). При этом условии компоненты нагрузки S_i могут быть разложены на четыре составляющие (рис. 1, б):

$$S_i = S_{sym} \pm S_x \pm S_y \pm S_{xy}, \quad (1)$$

где S_{sym} — симметричная часть внешней нагрузки, действующая равномерно по всей поверхности загруженного фрагмента оболочки; S_x, S_y, S_{xy} — обратнo-симметричные компоненты внешней нагрузки:

$$\begin{pmatrix} S_{sym} \\ S_x \\ S_y \\ S_{xy} \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \\ -S_1 + S_2 - S_3 + S_4 \\ S_1 + S_2 - S_3 - S_4 \\ -S_1 + S_2 + S_3 - S_4 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

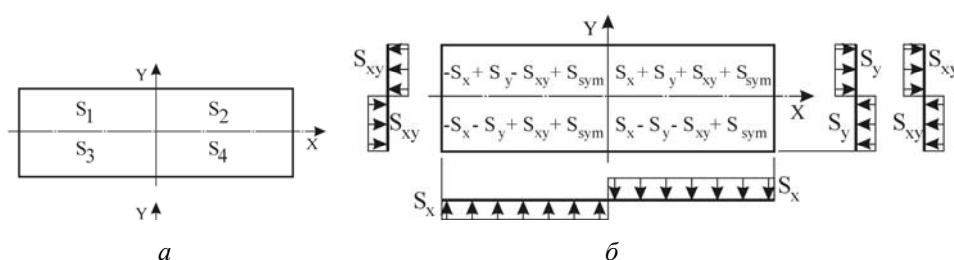


Рис. 1. Внешние нагрузки, действующие на поверхность фрагмента пневматической оболочки: *a* — загрузка четвертей поверхности; *б* — представление внешних нагрузок в виде симметричной и обратнo-симметричных составляющих

Нелинейность работы полимерной пленки заключается в непропорциональном изменении напряжений при увеличении деформаций. Например, для материала ЭТФЭ (ETFE), применяемого в настоящее время в покрытиях зданий и сооружений, рекомендуется вычислять напряжения только по экспериментально полученным кривым (σ — ε), в зависимости от относительных деформаций¹.

Учет нелинейных свойств материала предлагается производить в соответствии с алгоритмом [2], иллюстрация работы которого приведена на рис. 2. При этом поверхность пленки разделяется на множество участков с заранее неизвестными жесткостями, которые определяются итерационным методом.

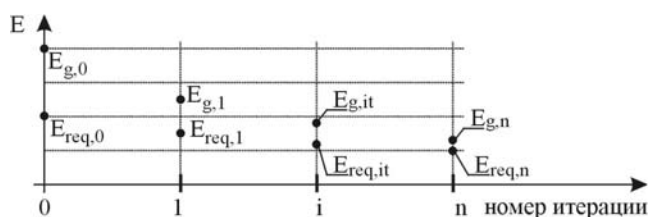


Рис. 2. Итерационный поиск жесткостей материала оболочки, подверженной нагрузкам: *it* — номер итерации, E_g — заданный модуль упругости пленки на рассматриваемом участке оболочки, E_{req} — требуемый модуль упругости

¹ DuPont. Tefzel® fluoropolymer resin. Properties handbook [Электронный ресурс]. URL: http://www2.dupont.com/Teflon_Industrial/en_US/assets/downloads/h96518.pdf (дата обращения: 09.04.2014).

Требуемое значение E_{req} вычисляется по экспериментальной кривой (σ — ε), взятой, например из², при известной относительной деформации ε , полученной в результате статического анализа оболочки, имеющей заданные жесткости E_g . Решение найдено при выполнении условия:

$$\Psi_i \leq \Psi_{lim},$$

где Ψ_{lim} — допустимая погрешность, %; Ψ_i — погрешность на участке i оболочки:

$$\Psi_i = \frac{|E_g - E_{req}|}{0,5(E_g + E_{req})} 100 \%. \quad (3)$$

Вычисление E_g для проведения последующей итерации производится по формуле:

$$E_{g, it+1} = \frac{k_1 E_{g, it} + k_2 E_{req, it}}{k_1 + k_2},$$

где it — номер текущей итерации, для которой были заданы модули упругости участков пневматической оболочки $E_{g, it}$ и вычислены требуемые модули упругости $E_{req, it}$ по кривой (σ — ε); k_1 и k_2 — положительные параметры, определяющие степень изменения жесткости на итерации.

Для сокращения числа итераций, на начальном этапе поиска решения следует увеличить второй параметр, приняв $k_2 = (2...3)k_1$. Вместе с тем, при появлении признаков расходимости итерационного процесса, когда каждое последующее решение приводит к более значительным ошибкам (3), чем предыдущее, необходимо увеличить параметр k_1 относительно k_2 .

Начальные приближения $E_{g, 0}$ для каждой точки поверхности фрагмента пневматической оболочки вычисляются по кривой (σ — ε) в зависимости от относительной деформации на рассматриваемом участке:

$$\varepsilon_{v_\gamma} = \frac{L_{c, v_\gamma} - L_{0, \gamma}}{L_{0, \gamma}} - \alpha \Delta t, \quad (4)$$

где ε_{v_γ} — относительная деформация участков вертикального сечения v_γ (рис. 3); γ — координатная ось (X или Y), параллельная вертикальному сечению; $L_{0, \gamma}$ — общая длина сечения v_γ в недеформированном состоянии: $L_{0, x} = L_x / 2$ и $L_{0, y} = L_y / 2$; L_x , L_y — размеры опорного контура оболочки (см. рис. 3); L_{c, v_γ} — общая длина сечения под нагрузкой; α — коэффициент температурного расширения материала оболочки; Δt — изменение температуры, °C.

² Там же.

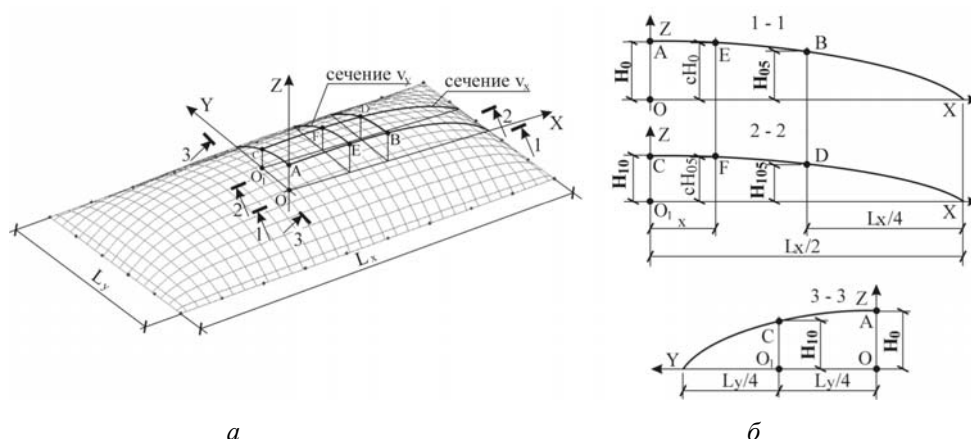


Рис. 3. Фрагмент пневматической оболочки: *a* — аксонометрическая схема, *б* — сечения

Для вычисления длин L_c , входящих в (4), поверхность фрагмента оболочки аппроксимируется функцией $Z(x, y)$, обобщающей и уточняющей результаты [3, 4]:

$$Z(x, y) = Q[y, cH_0(x), cH_{05}(x), L_y] + (V_y + V_{xy} \operatorname{sn}(x)) cH_0(x) \sin\left(\frac{2\pi}{L_y} y\right), \quad (5)$$

где x, y — координаты проекции точки поверхности на плоскость (XOY) опорного контура (см. рис. 3); $cH_0(x), cH_{05}(x)$ — функции:

$$cH_0(x) = G(x, H_0, H_{05}), \quad cH_{05}(x) = G(x, H_{10}, H_{105}), \quad cH_{05} > 0,75cH_0, \quad (6)$$

где $H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105}$ — высоты фрагмента оболочки, подверженного действию равномерной нагрузки (см. рис. 3): $H_{05} > 0,75H_0$ и $H_{105} > 0,75H_{10}$; V_x, V_y и V_{xy} — параметры, учитывающие действие обратно-симметричных загрузок; $\operatorname{sn}(x)$ — функция (7): $\operatorname{sn}(x) \approx 1$ при $x > 0$ и $\operatorname{sn}(x) \approx -1$ при $x < 0$; $G(x, h_0, h_{05})$ — функция (8); $Q(\gamma, h_0, h_{05}, L_\gamma)$ — функция (9), проходящая через заданные точки $(0; h_0), (0,25L_\gamma; h_{05}), (0,5L_\gamma; 0)$ в координатах (γ, Q) :

$$\operatorname{sn}(x) = \frac{2}{1 + e^{-xK}} - 1, \quad (7)$$

где K — коэффициент, принятый равным $K = 32 / L_x$;

$$G(x, h_0, h_{05}) = Q(x, h_0, h_{05}, L_x) + V_x h_0 \sin\left(\frac{2\pi}{L_x} x\right), \quad (8)$$

$$Q(\gamma, h_0, h_{05}, L_\gamma) = \frac{\tau^2 - \tau(e^{\gamma U} + e^{-\gamma U}) + 1}{(\tau - 1)^2} h_0, \quad (9)$$

где $\tau(h_0, h_{05}) = \left[\frac{2h_{05} - h_0 + \sqrt{h_0(4h_{05} - 3h_0)}}{2(h_{05} - h_0)} \right]^2$, $U(\tau, L_\gamma) = 2 \frac{\ln(\tau)}{L_\gamma}$.

Неизвестные параметры $\vec{Hs} = (H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105}, V_x, V_y, V_{xy})^T$ функции (5) вычисляются из условия равновесия [5] поверхности:

$$Z_{xx}\sigma_x \frac{\sqrt{1+Z_y^2}}{\sqrt{1+Z_x^2}} + Z_{yy}\sigma_y \frac{\sqrt{1+Z_x^2}}{\sqrt{1+Z_y^2}} + 2Z_{xy}\sigma_{xy} = -(p_z - p_x Z_x - p_y Z_y) \sqrt{1+Z_x^2+Z_y^2}, \quad (10)$$

где $Z_x, Z_y, Z_{xx}, Z_{yy}, Z_{xy}$ — частные производные функции (5); $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ — поверхностные нормальные и касательные напряжения в рассматриваемой точке, кН/м; p_x, p_y, p_z — нагрузки, кН/м²:

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} = \frac{P_r}{\sqrt{1+Z_x^2+Z_y^2}} \begin{pmatrix} -Z_x \\ -Z_y \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где P_r — внутреннее избыточное давление; q_x, q_y, q_z — внешние нагрузки, распределенные по площади, действующие в направлении координатных осей X, Y или Z .

Исследования показали, что касательные напряжения σ_{xy} в полимерной поверхности пренебрежимо малы по сравнению с нормальными напряжениями σ_x и σ_y , вычисляемыми по формуле:

$$\sigma_{x,y} = \sigma \delta, \quad (12)$$

где σ — напряжение по экспериментальной кривой (σ — ϵ) в зависимости от относительных деформаций, полученных из (4); δ — толщина материала оболочки, м.

Условие (10) можно представить в виде:

$$F = \frac{A}{B} = 1, \quad (13)$$

где F, A, B — функции параметров $\vec{Hs}$, вычисленные в каждой точке поверхности; A — левая часть выражения (10), характеризующая внутренние напряжения в оболочке, B — правая часть (10), характеризующая внешние нагрузки.

Параметры $\vec{Hs}$ предлагается определять методом наименьших квадратов. Для этого функция F линеаризуется разложением в ряд Тейлора:

$$F_t(x, y, \vec{Is}, \vec{Hs}) = \sum_{k=1}^{n_p} f_k(x, y, \vec{Is}) Hs_k + \left[F(x, y, \vec{Is}) - \sum_{k=1}^{n_p} f_k(x, y, \vec{Is}) Hs_k \right], \quad (14)$$

где $\vec{Is}$ — приближение к $\vec{Hs}$; $n_p = 7$ — число параметров; f_k — частная производная по параметру k в точке $\vec{Is}$:

$$f_k(x, y, \vec{Is}) = \frac{dF(x, y, \vec{Is})}{dHs_k}.$$

Искомые параметры $\vec{Hs}$ вычисляются по известной зависимости:

$$\vec{Hs} = M^{-1} \vec{W}, \quad (15)$$

где

$$M_{i,j} = \sum_{u=1}^N f_i(x_u, y_u, \vec{Is}) f_j(x_u, y_u, \vec{Is}), \quad (16)$$

$$W_i = \sum_{u=1}^N f_i(x_u, y_u, \vec{Is}) \left[Y_u - \left(F(x_u, y_u, \vec{Is}) - \sum_{k=1}^{n_p} f_k(x_u, y_u, \vec{Is}) Is_k \right) \right], \quad (17)$$

где N — количество точек поверхности, в которых производится проверка условия (13); $Y_u = \text{const} = 1$ — требуемое значение функции F в каждой точке поверхности; $i, j \in [1, n_p]$.

Достоверность найденного из системы (15) решения $\vec{Hs}$ при заданном начальном приближении $\vec{Is}$ оценивается по формуле:

$$\Omega = \sum_{u=1}^N \left| Y_u - F(x_u, y_u, \vec{Hs}) \right| \frac{1}{N} 100 \%. \quad (18)$$

Если полученная из (18) усредненная ошибка Ω превышает предельно допустимую, принимается новое приближение $\vec{Is} = \vec{Hs}$ и производится перерасчет.

Поиск значений параметров $\vec{Hs}$ производится отдельно для верхнего $\left(\vec{Hs}_T \right)$ и нижнего $\left(\vec{Hs}_B \right)$ фрагментов пневматической оболочки из условия (13) при заданном внутреннем избыточном давлении P_g , входящем в (11) вместо P_r .

Внутреннее давление, из условия изменения объема и температуры эксплуатации пневматической оболочки, вычисляется по формуле:

$$P_{req} = (P_0 + P_a) \frac{t_1 - T_{abs}}{t_0 - T_{abs}} \frac{V_0}{V_1} - P_a, \quad (19)$$

где P_0 — внутреннее избыточное давление, создаваемое при заполнении оболочки воздухом, находящимся при температуре t_0 , °C в объеме V_0 ; t_1 — эксплуатационная температура, °C; V_1 — объем оболочки под нагрузкой; $T_{abs} = -273,15$ — абсолютная нулевая температура, °C; P_a — атмосферное давление.

Объемы V_1 и V_0 вычисляются интегрированием (5) при параметрах $\vec{Hs}_T$, $\vec{Hs}_B$ и $\vec{Hs}_{0,T}$, $\vec{Hs}_{0,B}$, соответственно. $\vec{Hs}_{0,T}$ и $\vec{Hs}_{0,B}$ определяются из условия (13) при $P_r = P_0$, $q_x = q_y = q_z = 0$ (11).

Расхождение между P_g и P_{req} оценивается по формуле:

$$\Theta = \frac{P_{req} - P_g}{P_g} 100 \% . \quad (20)$$

Итерационный алгоритм минимизации ошибки (20) приведен в [2].

Для примера рассмотрена пневматическая оболочка, выполненная из пленки ЭТФЭ толщиной 0,25 мм, имеющая размеры в плане 4×8 м, состоящая из верхнего и нижнего фрагментов. Оболочка заполняется воздухом до достижения начального избыточного давления $P_0 = 2,0$ кПа.

Верхний фрагмент оболочки подвержен действию внутреннего избыточного давления P_g и неравномерной вертикальной внешней нагрузки $\vec{S} = (S_1, S_2, S_3, S_4)^T = (-0,75, -1,25, +0,75, -0,75)^T$ кПа. Положительное направление нагрузки соответствует направлению оси Z (см. рис. 3). Каждый из компонентов $\vec{S}$, в соответствии с (2), раскладывается на симметричную и обратно-симметричные составляющие: $S_{sym} = -0,5$, $S_x = -0,5$, $S_y = -0,5$, $S_{xy} = 0,25$ кПа. Нижний фрагмент оболочки подвержен только давлению P_g .

Предполагается, что эксплуатация оболочки производится при постоянной температуре. В соответствии с методикой [2] найдено внутреннее избыточное давление $P_g = 2,255$ кПа при условии ограничения невязки Θ , вычисленной по (20), значением в 5 %.

Получены параметры $\vec{Hs}$ функции поверхности (5) верхнего и нижнего фрагментов оболочки:

$$\vec{Hs}_T = (0,656, 0,581, 0,502, 0,452, -0,177, -0,066, 0,015)^T ,$$

$$\vec{Hs}_B = (0,783, 0,710, 0,613, 0,566, 0, 0, 0)^T .$$

Из (4) найдены усредненные относительные деформации (ε_{v_x} и ε_{v_y}) сечений поверхности, параллельных плоскостям XOZ и YOZ, по которым из кривой (σ — ε) найдены начальные приближения жесткостей $E_{g,0}$.

Статический анализ работы оболочки при заданных жесткостях $E_{g,0}$ участков поверхности произведен в лицензионном программном комплексе EASY 8.3³. Относительные ошибки (3) начальных приближений $E_{g,0}$ приведены на рис. 4.

³ EASY. Product overview. URL: <http://www.technet-gmbh.com/index.php?id=63&L=1>. (дата обращения: 09.04.2014).

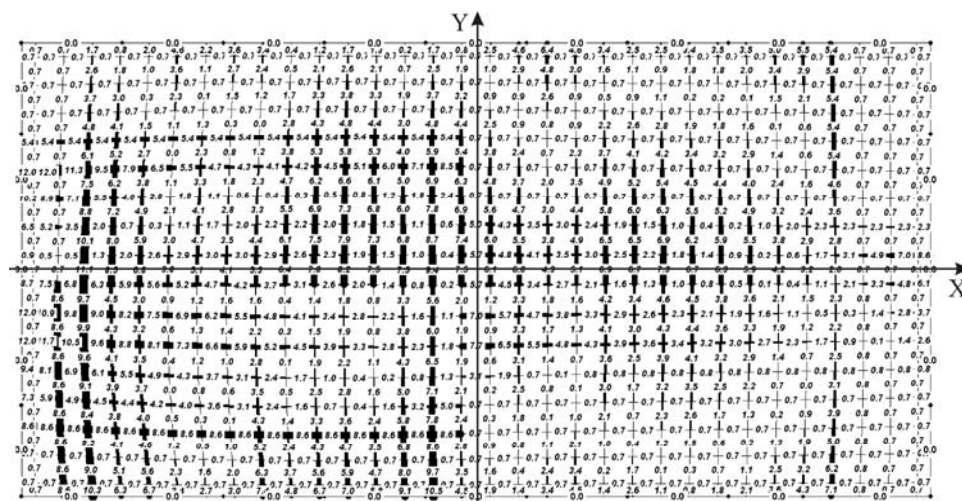


Рис. 4. Относительные погрешности (3) начальных приближений $E_{g,0}$ в верхнем фрагменте пневматической оболочки, %

Из рис. 4 видно, что максимальная относительная погрешность при выполнении целенаправленного поиска начальных приближений не превышает 12 %. Сравнение очертаний поверхности загруженного внешней нагрузкой фрагмента оболочки приведено на рис. 5.

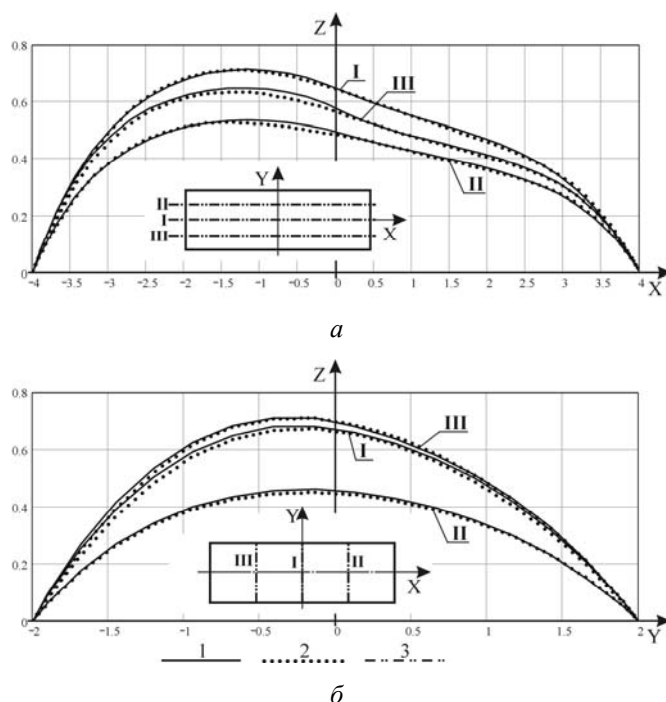


Рис. 5. Поверхность верхнего фрагмента пневматической оболочки, подверженного действию внешних нагрузок: *a* — сечения плоскостями, параллельными плоскости XOZ ; *б* — сечения плоскостями, параллельными плоскости YOZ ; 1 — результаты анализа в программном комплексе EASY 8.3, 2 — графики функции (5) при найденных параметрах Hs_r , 3 — местоположение сечений

Предложенную методику учета внешнего несимметричного нагружения пневматической оболочки следует применять при условии ограничения компонентов нагрузки S_i ($i=1...4$, см. рис. 1, а):

$$|S_i| < 0,75P, \quad (21)$$

где $P = P_0$; P_0 — то же, что и в (19).

При невыполнении (21) необходимо разбить внешнюю нагрузку на ряд ступеней n_s , соответствующих (21), для пошагового определения равновесного внутреннего давления $P_{l,g}$, где l — номер ступени нагружения: $l \in [1, n_s]$.

При $l > 1$ в условие (21) следует подставить $P = P_{(l-1),g}$.

При условии (21), а также при сохранении постоянного значения симметричной части S_{sym} внешней нагрузки, изменение обратно-симметричных компонентов (S_x, S_y, S_{xy}) оказывает пренебрежимо малое влияние на изменение внутреннего избыточного давления и на высоты фрагментов оболочки $H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105}$, входящие в (5).

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Внешняя неравномерная нагрузка, действующая на пневматическую оболочку на прямоугольном плане и состоящая из компонентов S_i ($i=1...4$, см. рис. 1, а), каждый из которых равномерно загружает четверть поверхности оболочки, ограниченную осями симметрии (X и Y), может быть разложена на симметричную и обратно-симметричные составляющие в соответствии с (2) и рис. 1, б.

2. Поверхность фрагмента пневматической оболочки на прямоугольном плане, находящегося под действием внешней неравномерной нагрузки, которая может быть разложена в соответствии с (2), определяется функцией (5), зависящей от параметров $\vec{Hs} = (H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105}, V_x, V_y, V_{xy})^T$.

3. Для определения компонентов $\vec{Hs}$ предлагается использовать условие равновесия поверхности (13), линеаризуемое рядом Тейлора, и метод наименьших квадратов.

4. Начальные приближения жесткостей участков пневматической оболочки $E_{g,0}$ вычисляются по известным значениям $\vec{Hs}$.

5. Получаемые результаты (значения $\vec{Hs}$ и жесткости $E_{g,0}$) при выполнении условия (21) находятся в близком соответствии с результатами статического расчета в лицензионном программном комплексе EASY 8.3 и могут использоваться в инженерных расчетах и на стадии вариантного проектирования пневматической оболочки.

6. При невыполнении условия (21) необходимо применить метод последовательных нагружений, разбив внешнюю нагрузку на ряд ступеней, в соответствии с (21) для пошагового определения равновесного внутреннего давления на каждой ступени.

7. Первые четыре компонента $\vec{Hs} (H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105})$, а также избыточное давление внутри оболочки, не зависят от обратно-симметричных компонентов (S_x, S_y, S_{xy}) внешней нагрузки, которые влияют только на последние три компонента $\vec{Hs} : (V_x, V_y, V_{xy})$.

8. В упрощенных инженерных расчетах возможно найти значения компонентов $\vec{Hs}$ методом последовательного перебора. При этом для сокращения времени вычислений компоненты $(H_0, H_{05}, H_{10}, H_{105})$ следует определить отдельно, приняв в качестве внешней нагрузки только равномерную симметричную часть S_{sym} .

9. Результаты работы следует использовать для проектирования и дальнейшего исследования воздухонаполненных пневматических оболочек, подверженных действию как внешних нагрузок, так и температурных воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. LeCuyer A. ETFE. Technology and design. Basel-Boston-Berlin : Birkhauser, 2008. 160 p.
2. Чесноков А. В. Влияние изменения температуры на работу фрагментов пневматических оболочек // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Строит. информатика. 2013. Вып. 9(26). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Chesnokov-2013_9\(26\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Chesnokov-2013_9(26).pdf) (дата обращения: 09.04.2014).
3. Чесноков А. В. Исследование формы поверхности фрагментов пневматических оболочек // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. № 32(51) С. 76—83.
4. Чесноков А. В., Михайлов В. В. Легкие эффективные конструкции покрытия зданий и сооружений. Системы из тросов, тентовых материалов и полимерных пленок. Saarbrücken. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 121 с.
5. Отто Ф., Тростель Р. Пневматические строительные конструкции. Конструирование и расчет сооружений из тросов, сеток и мембран. М., 1967. 320 с.
1. LeCuyer A. ETFE. Technology and design. Basel-Boston-Berlin : Birkhauser, 2008. 160 p.
2. Chesnokov A. V. Vliyaniye izmeneniya temperatury na rabotu fragmentov pnevmaticheskikh obolochek // Internet-Vestnik VolgGASU. 2013. Vyp. 9(26). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Chesnokov-2013_9\(26\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/Chesnokov-2013_9(26).pdf) (data obrashcheniya: 09.04.2014).
3. Chesnokov A. V. Issledovanie formy poverkhnosti fragmentov pnevmaticheskikh obolochek // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Ser.: Stroitel'stvo i arhitektura. 2013. № 32(51) S. 76—83.
4. Chesnokov A. V., Mikhaylov V. V. Legkie effektivnye konstruksii pokrytiya zdaniy i sooruzhenii. Sistemy iz trosov, tentovykh materialov i polimernykh plenok. Saarbrücken. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 121 s.
5. Otto F., Trostel' R. Pnevmaticheskie stroitel'nye konstruksii. Konstruirovaniye i raschet sooruzhenii iz trosov, setok i membran. M., 1967. 320 s.

© Чесноков А. В., 2014

Поступила в редакцию
в мае 2014 г.

Ссылка для цитирования:

Чесноков А. В. Работа пневматических оболочек на прямоугольном плане под действием неравномерных внешних нагрузок // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительная информатика. 2014. Вып. 11(32). Ст. 7. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Chesnokov A. V. [The work of pneumatic envelopes arranged on rectangular plan subjected to non-uniform external loadings]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 11(32), paper 7. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>