

УДК 624.953

**МЕСТНОЕ ВЫПУЧИВАНИЕ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
КВАДРАТНЫХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ С ШАРНИРНЫМ ОПИРНИЕМ
НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОЖАРНЫХ-СПАСАТЕЛЕЙ**

**В.Н. АГАЕВ; канд. физ.-мат. наук Т.М. МАРТЫНЕНКО
(Университет гражданской защиты МЧС Республики Беларусь, Минск);
канд. физ.-мат. наук С.А. ПРОНКЕВИЧ; канд. физ.-мат. наук И.М. МАРТЫНЕНКО
(Белорусский национальный технический университет, Минск)**

Представлена созданная математическая модель для расчета прямоугольных и квадратных в плане конструкций с неизменяемой геометрией, при комбинированном нагружении, основанная на методе начальных параметров. Полученная зависимость позволяет определить поля напряженно-деформированного состояния при моделировании модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей и его механического поведения под воздействием собственного веса. Проведены виртуальные испытания в пакете ANSYS. Показаны опасные площади при оценке деформаций при местном выпучивании в соответствии с минимальным критическим напряжением.

Ключевые слова: оболочечные конструкции, математическая модель, модульный тренажерный комплекс, комбинированное нагружение, критические нагрузки.

Научно-технический прогресс в области создания металлических конструкций связан с поиском новых типов и геометрических форм, совершенствованием уже известных конструкций, определением их оптимальных параметров, совершенствованием методов их расчета. При правильном использовании достижений науки и техники возможно снизить материалоемкость строительных металлических сооружений примерно на 10...20%. В повышении уровня современного строительства важнейшее место отводится внедрению легких металлических элементов. Уменьшение массы приводит к снижению материалоемкости, затрат на изготовление и транспортировку. Становится возможным и предварительная сборка, и блочный монтаж. Дальнейшее совершенствование процессов проектирования, изготовления, комплексной поставки и монтажа легких металлических конструкций промышленных зданий требует сочетания оптимальных показателей массы с минимальной трудоемкостью механизированного поточного изготовления. Стремление сочетать эти факторы делает рациональным применение пространственных конструкций, в основе которых лежат однотипные многократно повторяющиеся элементы из наиболее эффективных профилей (трубчатых, тонкостенных, гнутых).

Современная цивилизация использует все более сложные конструкции, обеспечение прочности и надежности которых имеет первостепенное значение. Конструкции, одновременно работающие на силовые воздействия, широко применяются в различных отраслях народного хозяйства: будь то выплавка чугуна и стали, термообработка металла, изготовление и переработка нефтепродуктов и химических удобрений, сушка и обжиг строительных материалов, выпуск продуктов пищевой промышленности и т.д. Проектирование таких объектов должно в первую очередь базироваться на современных методах расчета, позволяющих удовлетворять всем обозначенным требованиям.

В настоящее время обширный круг инженерных конструкций самого разного назначения классифицируют как сложные структуры, проектный анализ которых даже при использовании специальных программ остается трудоемкой задачей. Одной из важных проблем проектного анализа является исследование устойчивости таких конструкций в целом.

Основная часть. Психологическая подготовка газодымозащитников к работе в сложных условиях тушения пожаров и ликвидации их последствий – основа не только эффективности боевой работы по спасению людей и снижению ущерба от уничтожения огнем, но и безопасности самих пожарных-спасателей. Значительное влияние на подготовку личного состава к действиям в экстремальных условиях оказывает наличие современных учебно-тренировочных комплексов.

С учетом того, что блоки тренажерного модуля будут подвергаться многократному перепаду температур, воздействию воды и огнетушащих жидкостей при тушении учебного пожара, для их монтажа должны быть использованы материалы, стойкие к непрерывному и многократному быстрому увеличению температуры с последующим быстрым охлаждением, а также устойчивые к напряжениям, возникающим внутри несущих конструкций, газовой и жидкостной коррозии. Наиболее экономически и технически оправданным представляется использование для этих целей объединяющей несущей конструкции типа стандартного морского контейнера 40 футов (High Cube).

Контейнер представляет собой жесткую конструкцию прямоугольную в плане из стали со следующими размерными характеристиками: длина (мм) 12192; ширина (мм) 2438; высота (мм) 2896. Дверной проем: ширина (мм) 2340; высота (мм) 2597. Контейнер, имеющий грузоподъемность 26280 кг, представлен на рисунке 1.

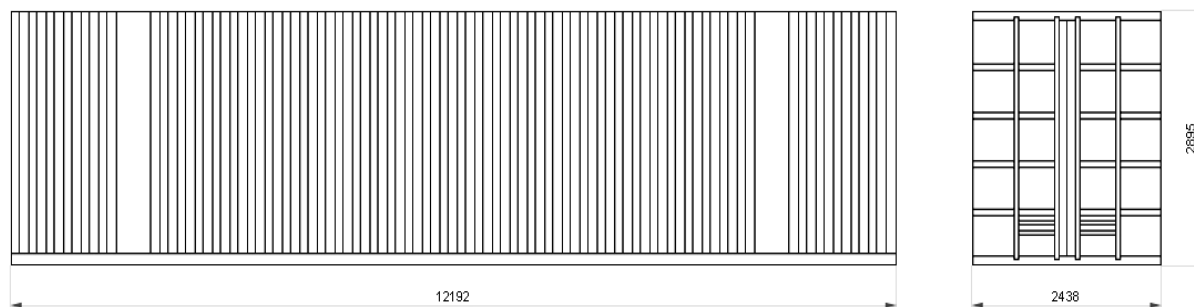


Рисунок 1. – Морской 40-футовый контейнер

Таким образом, для оптимизации тренировочного процесса необходимо создать тренажерный комплекс, который наиболее полно отвечает современным требованиям: оснащенный системами создания огненного воздействия, дымоимитации, дымоудаления, звукового и светового воздействия, систем освещения, слежения, аварийной эвакуации, контроля температурного режима и предельно-допустимой концентрации газа.

Постановка задачи местного выпучивания элементов тренажерного комплекса. Для моделирования его механического поведения под воздействием собственного веса. В работе предлагаются трехмерные конечно-элементные модели. На основе этих моделей проведены виртуальные испытания статического напряженно-деформированного состояния, возникающего под действием собственного веса на примере составленных модулей 40-футовых морских контейнеров, поставленных один на один (рисунок 2). Для расчета была использована упрощенная модель.

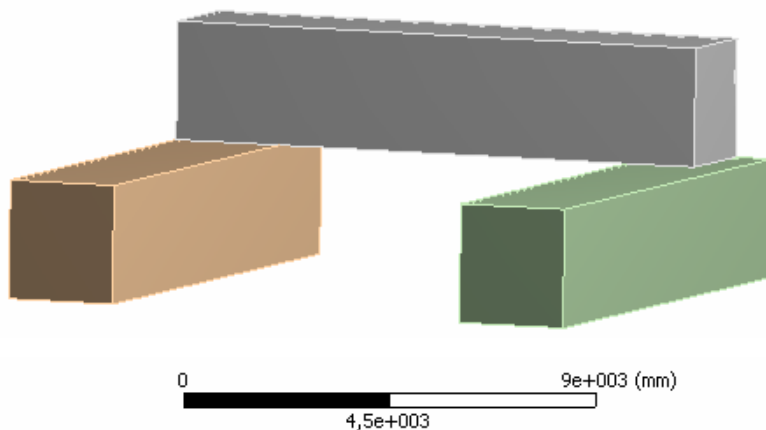


Рисунок 2. – Расчетная модель выпучивания стенок модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей

Повреждения тонкостенных конструкций вследствие потери устойчивости встречаются довольно часто. В большинстве случаев повреждения вызывают местные нагрузки, но случаются также и повреждения от действия сжимающих усилий при общем изгибе корпуса конструкции или при действии ударных нагрузок. Местное выпучивание пластинчатых элементов сжатых стержней представляет собой только частный случай неустойчивости пластин. При проектировании металлических конструкций возникают вопросы, касающиеся неустойчивости пластин в условиях нагружения, отличных от тех, которые имеют место в строительных элементах, находящихся под действием сжимающей нагрузки.

Расчеты на устойчивость базируются на строгой теории, созданной выдающимися учеными: И.Г. Бубновым, В.З. Власовым, А.С. Вольмиром, В.Н. Новожиловым, П.Ф. Папковичем, Ю.А. Шиманским [1–4] и другими. Особое внимание в исследованиях уделено составляющим элементам конструкции корпуса: балкам, пластинам, перекрытиям. По оболочкам правильной формы – коническим, сферическим,

цилиндрическим – представлен обширный материал экспериментальных и теоретических исследований. Разработанные численные методы и аналитические зависимости позволяют получить достоверные результаты решения задачи устойчивости для таких элементов конструкции.

С одной стороны, стремление учесть более полно работу конструкций в целом, создание рациональных корпусных конструкций, обладающих высокой прочностью и устойчивостью, необходимость снижения веса, усложнение объектов требует уточнения методов расчетов, а с другой – часто делает невозможным получение точных аналитических решений. Поэтому недостаточно проводить расчеты только отдельных элементов корпуса по аналитическим формулам, необходимо рассчитывать конструкцию как систему в целом, учитывать взаимодействие и взаимовлияние элементов друг на друга.

Изложенное ниже исследование базируется на основном дифференциальном уравнении для прогиба w тонкой плоской пластинки под действием сил, находящихся в ее срединной плоскости. Это уравнение выводится при предположении малости прогиба w по сравнению с толщиной пластинки и имеет вид [1]:

$$\frac{EI}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \left(\sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2\tau_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + \sigma_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где σ_x и σ_y – соответственно нормальные напряжения в направлении осей x или y ; τ_{xy} – касательное напряжение в сечении, перпендикулярном к плоскости пластинки и параллельном оси x или y .

Рассмотрим случай, когда на краях b действует равномерно распределенная сжимающая нагрузка, напряжения σ_x будут постоянными, а σ_y и τ_{xy} равны нулю. Тогда дифференциальное уравнение прогиба w принимает следующий упрощенный вид:

$$\frac{EI}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (2)$$

Уравнение (2) является однородным дифференциальным уравнением. В настоящем его виде дифференциальное уравнение (1) применимо только в пределах закона Гука и должно быть видоизменено для случая, когда значение σ_x превосходит предел пропорциональности.

Уравнение (2) в случае пластических деформаций принимает вид [2]:

$$D \left(\tau \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\sqrt{\tau} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) + t \sigma_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (3)$$

где $D = \frac{EI}{1-\nu^2}$.

Решение дифференциального уравнения (3) в частных производных должно удовлетворять граничным условиям на всех четырех краях пластинки. Исследуем граничные условия на нагруженных краях b (остальные два края рассмотрим далее). В случае шарнирного опирания края пластины на жесткую опору получим, что перемещение w и моменты M_x на краях $x=0$, $x=a$ равны нулю.

Согласно уравнению [3] имеем

$$w=0, \quad M_x = -D \left(\tau \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = 0.$$

Так как, по предположению, края $x=0$, $x=a$ остаются прямыми, выражение $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$ равно нулю, отсюда граничные условия будут следующими:

$$w=0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (3) и граничные условия (4) удовлетворяются при помощи выражения

$$w = Y \sin \frac{n\pi x}{a} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

где Y является функцией от y , подлежащей определению.

Вводя это выражение в дифференциальное уравнение (3) и исключая $\sin \frac{n\pi x}{a}$, получим обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка

$$\frac{d^4 Y}{dy^4} - 2\sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \left(\tau \left(\frac{n\pi}{a} \right)^4 - \frac{\sigma_{кр} t}{D} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \right) Y = 0.$$

В этом уравнении напряжение σ_x заменено через $\sigma_{кр}$, обозначающее неизвестное критическое продольное напряжение, при котором пластинка выпучивается. С учетом обозначения

$$\mu^2 = \frac{\sigma_{кр} t}{D\tau} \left(\frac{a}{n\pi} \right)^2 \quad (6)$$

представленное выше дифференциальное уравнение примет следующий вид:

$$\frac{d^4 Y}{dy^4} - 2\sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{d^2 Y}{dy^2} + \tau \left(\frac{n\pi}{a} \right)^4 (1 - \mu^2) Y = 0. \quad (7)$$

Из этого дифференциального уравнения определяется значение параметра μ , при помощи которого на основе уравнения (6) получим следующую формулу для критического напряжения:

$$\sigma_{кр} = \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 \frac{D\tau}{t} \mu^2. \quad (8)$$

Общее решение уравнения (5) имеет вид

$$Y = C_1 ch k_1 y + C_2 sh k_1 y + C_3 \cos k_2 y + C_4 \sin k_2 y, \quad (9)$$

где значения k_1 и k_2 определяются из выражений:

$$k_1 = \frac{n\pi}{a} \sqrt[4]{\tau} \sqrt{\mu+1}, \quad k_2 = \frac{n\pi}{a} \sqrt[4]{\tau} \sqrt{\mu-1}. \quad (10)$$

Таким образом, общее решение уравнения (2), выраженное при помощи уравнения (8), в результате принимает следующий вид:

$$w = \sin \frac{n\pi x}{a} (C_1 ch k_1 y + C_2 sh k_1 y + C_3 \cos k_2 y + C_4 \sin k_2 y). \quad (11)$$

Значения постоянных необходимо определить таким образом, чтобы удовлетворять граничным условиям на двух краях.

Удобно использовать следующую систему координат x, y : ось x совпадает с опертым краем a , ось y проведена вдоль левого края пластинки. В связи с тем, что симметрии относительно оси x не существует, необходимо использовать общее решение дифференциального уравнения (11), а k_1 и k_2 определим из уравнения (10).

Граничные условия, определяющие значения четырех постоянных, следующие [4]:

$$\text{для } \varphi = \bar{\varphi}; y = 0, w = 0, \text{ и } \varphi = \bar{\varphi}; \text{ для } y = b, M_y = 0, \text{ и } Q_y = 0. \quad (12)$$

Второе выражение в (12) представляет собой условие непрерывности, которое показывает, что угол поворота φ на краю полученной пластинки равен углу поворота $\bar{\varphi}$ жесткой пластинки, к которой она прикреплена, Q_y есть поперечная сила на свободном крае. Для того чтобы иметь возможность ввести решение (11) в граничное условие (12), необходимо выразить значения φ и $\bar{\varphi}$ через прогиб w . Предположим, что изгибающий момент M_y на единицу длины, действующий на краю при искривлении пластинки, пропорционален углу $\bar{\varphi}$. Эту упругую реакцию можно выразить следующим уравнением:

$$M_y = -\bar{\zeta} \bar{\varphi}, \quad (13)$$

где $\bar{\zeta}$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров опоры, предполагается постоянным вдоль края.

С другой стороны, момент M_y согласно уравнению [3] равен $M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$. Так как везде вдоль краев a $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$, то это уравнение сводится к следующему $M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$. Подставляя полученное в (13), имеем $\bar{\varphi} = \frac{D}{\zeta} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$. В связи с тем, что $\varphi = \pm \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)$, граничное условие (12) будет иметь вид $\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{D}{\zeta} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$. Отношение $\frac{D}{\zeta}$ имеет размерность длины, поэтому целесообразно записать уравнение в следующем виде:

$$\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{b}{2} \zeta \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} = 0, \quad (14)$$

где ζ определяется выражением $\zeta = \frac{2D}{b\bar{\zeta}}$. Величина ζ является безразмерным числом и предполагается постоянной вдоль краев a . Она является функцией размеров выпучивающейся и опорной пластинок и называется коэффициентом заделки.

Для M_y и Q_y имеем выражения [4]; отсюда граничные условия (12) запишутся в следующем виде:

$$\begin{aligned} M_y &= -D \left(\nu \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=b} = 0, \\ Q_y &= -D \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + (2-\nu) \sqrt{\tau} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \Big|_{y=b} = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

Подставляя решение (11) в граничные условия для $y=0$, получим

$$C_1 = -C_2, C_2 = C_4 \frac{k_2}{k_1} - C_3 \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2}.$$

С учетом этих выражений уравнение (11) примет следующий вид

$$w = \sin \frac{2\pi x}{a} \left(C_3 \left(\cos k_2 y - \operatorname{ch} k_1 y - \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2} \operatorname{sh} k_1 y \right) + C_4 \left(\sin k_2 y - \frac{k_2}{k_1} \operatorname{sh} k_1 y \right) \right).$$

Вводя это выражение в два граничных условия (15), получим следующие два уравнения:

$$\begin{aligned} C_3 \left(r \cos k_2 b + t \operatorname{ch} k_1 b + h t \operatorname{sh} k_1 b \right) + C_4 \left(r \sin k_2 b + t \frac{k_2}{k_1} \operatorname{sh} k_1 b \right) &= 0, \\ C_3 \left(t \frac{k_2}{k_1} \sin k_2 b - r \operatorname{sh} k_1 b - h r \operatorname{ch} k_1 b \right) - C_4 \left(t \frac{k_2}{k_1} \cos k_2 b + r \frac{k_2}{k_1} \operatorname{ch} k_1 b \right) &= 0, \end{aligned} \quad (16)$$

где r , t и h определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} r &= k_2^2 + \nu \sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 = k_1^2 - (2-\nu) \sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2, \\ t &= k_1^2 - \nu \sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2 = k_1^2 + (2-\nu) \sqrt{\tau} \left(\frac{n\pi}{a} \right)^2, \\ h &= \zeta \frac{b}{2} \frac{k_1^2 + k_2^2}{k_1^2}. \end{aligned}$$

Формула (16) представляет собой однородное линейное дифференциальное уравнение, и ненулевые значения для C_3, C_4 возможны только тогда, когда детерминант этой системы равен нулю. Следовательно, уравнение $\Delta = 0$ представляет собой критерий выпучивания, на основе которого получим условие устойчивости:

$$\frac{2rt}{ch k_1 b \cos k_2 b} + r^2 + t^2 - \frac{r^2 k_1^2 - t^2 k_2^2}{k_1 k_2} th k_1 b th k_2 b + h \left(t^2 th k_1 b - r^2 \frac{k_1}{k_2} tg k_2 b \right) = 0. \quad (18)$$

Значение критического напряжения $\sigma_{кр}$ перепишем в следующем виде [5]:

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \left(\left(\frac{n \sqrt{\tau}}{\alpha} \right)^2 + p + q \left(\frac{\alpha}{n \sqrt{\tau}} \right)^2 \right). \quad (19)$$

Параметры p и q в этом уравнении зависят от коэффициента заделки ζ . Они вычислены на основе уравнения (18).

Значение α , при котором напряжение имеет минимальное значение $\sigma_{кр}$, можно определить из условия $\frac{\partial \sigma_{кр}}{\partial \alpha} = 0$.

Это значение будет найдено по формуле

$$\alpha_0 = n \sqrt[4]{\frac{\tau}{q}}. \quad (20)$$

Таким образом,

$$\sigma_{кр, \min} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 (p + 2\sqrt{q}) = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 k, \quad (21)$$

где коэффициент устойчивости k не зависит от величины τ и имеет значение $k = p + 2\sqrt{q}$.

Из уравнения (20) следует, что с уменьшением степени упругой заделки величина α_0 будет постоянно возрастать, так как q монотонно убывает.

В предельном случае $q = 0$ значение отношения α_0 будет бесконечным, и пластинка будет выпучиваться по одной полуволне.

С увеличением α_0 критическое напряжение $\sigma_{кр, \min}$ убывает и асимптотически стремится к значению

$$\sigma_{кр, \min} = \frac{\pi^2 E \sqrt{\tau}}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 p. \quad (22)$$

В случае шарнирного опирания края пластины на жесткую опору пластинка, независимо от ее длины, будет выпучиваться по одной полуволне. Однако независимо от длины пластинки значение критического напряжения не может быть ниже значения, полученного по формуле (22). Если одна сторона пластинки упруго заделана, уравнение (20) показывает, что в случае достаточно длинной пластинки образуются несколько полуволн.

На рисунках 3 и 5 представлены результаты выполненных расчетов.

На рисунке 3 показаны опасные площади при оценке деформаций при местном выпучивании в соответствии с формулой (22).

Первым расчетом было определение выпучивания стенок контейнеров под действием собственного веса. Величина выпучивания составляет 0,12 мм.

Вторым расчетом было определение перемещений при объемной силе тяжести, равной 20 т, на верхнем модуле.

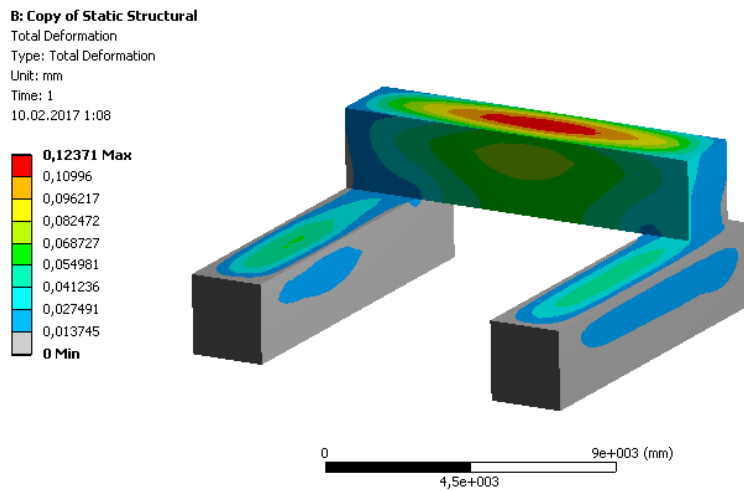


Рисунок 3. – Поля деформаций при местном выпучивании модульного тренажерного комплекса для подготовки пожарных-спасателей

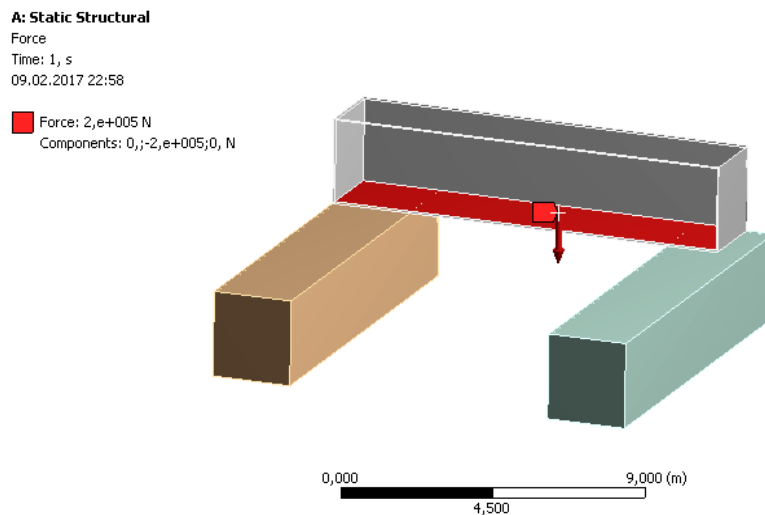


Рисунок 4. – Схема нагружения контейнера

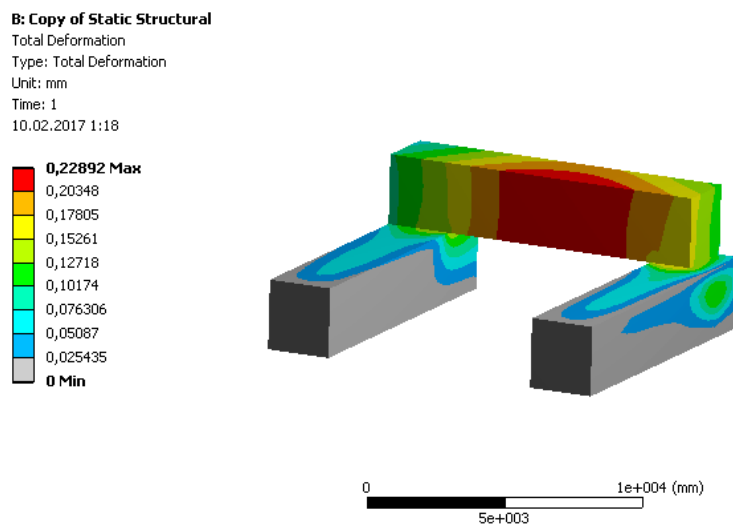


Рисунок 5. – Поля перемещений при втором варианте нагружения (максимальное перемещение увеличилось в 2 раза и составляет 0,23 мм)

Заключение. В результате проведенного исследования осуществлена постановка задачи оптимального проектирования оболочечных конструкций типа структур с квадратным и прямоугольным планом, обладающих прямолинейным либо криволинейным очертанием с заданным характером нагружения.

Создана математическая модель для расчета прямоугольных и квадратных в плане конструкций с неизменяемой геометрией, при комбинированном нагружении, основанная на методе начальных параметров.

Решена задача устойчивости и критического поведения гибких упругих и упругопластических полых оболочек и пластин при комбинированном нагружении.

Установлено влияние на величину критических нагрузок и закритическое поведение оболочки вида комбинированного нагружения, уровня продольных нагрузок, условий закрепления кромок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с.
2. Власов, В.З. Общая теория оболочек / В.З. Власов. – М. : Физматгиз, 1949. – 784 с.
3. Блейх, Ф. Устойчивость металлических конструкций / Ф. Блейх. – М. : Физматгиз, 1959. – 544 с.
4. Тимошенко, С.П. Пластинки и оболочки / С.П.Тимошенко, С.В. Войковский-Кригер. – М. : Физматгиз, 1963.
5. Расчет железобетонных конструкций на взрывные и ударные нагрузки / Н.Н. Белов [и др.]. – Томск : STT, 2004. – 465 с.
6. Bangash, M.Y.H. Explosion-Resistant Building Structures : Design, Analysis, and Case Studies / M.Y.H. Bangash, T. Bangash. – Berlin : Springer, 2006. – 450 с.

Поступила 17.02.2017

LOCAL BUCKLING OF SHELL STRUCTURES SQUARE AND RECTANGULAR WITH SWIVEL BEARING AN EXAMPLE OF A UNIT TRAINING COMPLEX FOR TRAINING FIREMEN-RESCUERS

V. AGAYEV, T. MARTYNENKO, S. PRONKEVICH, I. MARTYNENKO

The mathematical model for calculation rectangular and square in respect of designs with unchangeable geometry is created, at the combined loading, based on a method of initial parameters. Now uses the more and more composite designs, ensuring durability and which reliabilities, prime value has. Projection of such objects has to be based on the modern computational methods allowing to meet requirements of optimum projection of constructions first of all. The received dependence allows to define fields of an intense strained state at model operation of a modular training complex for training of fire rescuers and his mechanical behavior under the influence of sole weight. The virtual tests in an ANSYS package are carried out. The dangerous areas at assessment of deformations at a local swelling according to minimum critical stress are shown.

Keywords: shell structures, mathematical model, modular training complex, combined loading, the critical load.