

Tiutiunik V.V., Bondarev N.V., Shevchenko R.I., Chernogor L.F.,
Kalugin V.D.

Assessment of level of technogenic danger of the territory of Ukraine by data analysis of indicators of activity of regions methods of the factorial analysis and analysis main component

Results of an assessment are presented: a) method of the factorial analysis – correlations between the main indicators of activity of Ukraine; b) method main a component – an indicator of use of energy of a technogenic origin, as a grouping variable of the main indicators of activity of Ukraine in a mode of daily functioning and in the conditions of manifestation of emergency situations of a technogenic origin.

Key words: emergency situation, technogenic danger, power approach, multidimensional statistical methods, factorial analysis, analysis main component, complex system of the prevention of emergency situations

УДК 614.83

*Чернобрывко М.В., канд. техн. наук, преп., НУГЗУ,
Светличная С.Д., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ,
Комяк В.М., д-р техн. наук, проф., НУГЗУ*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАЩИТНЫХ КОНТЕЙНЕРАХ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Рассматривается составная оболочка под действием внутренней ударно-волновой нагрузки. Исследуется напряженно-деформированное состояние конструкции, поведение материала оболочки моделируется с учетом динамических свойств на основе экспериментальных данных. Результаты исследований позволяют выбирать условия нагружения, при котором конструкция сохраняет свою работоспособность.

Ключевые слова: динамическая прочность, ударно-волновая нагрузка, скоростное деформирование, составная оболочка

Постановка проблемы. В последние годы возросла потребность в портативных защитных контейнерах, способных выдерживать детонационное воздействие. К конструкциям подобного рода выдвигается целый ряд требований. Основные из них можно сформулировать следующим образом: высокая прочность конструкционного материала, относительно малый

Чернобрывко М.В., Светличная С.Д., Комяк В.М.

вес, компактность конструкции, возможность многоразового использования и другие. Эти требования диктуют необходимость нетрадиционных инженерных решений, связанных с созданием требуемой конструкции из материалов, обладающих достаточно высокой прочностью при заданном весе.

Анализ последних исследований и публикаций.

Основные исследования по данному вопросу в целом были направлены на решение задачи в рамках линейной теории Тимошенко методом конечных элементов [1-2]. Однако, характер развития зон пластических деформаций при динамическом нагружении с учетом различных факторов, сопровождающих процесс деформирования, исследован недостаточно полно. Дальнейшее изучение этого вопроса требует совместного теоретико-экспериментального исследования [3-4]. Естественно, экспериментальные исследования в этой области крайне трудоемки и требуют значительных финансовых затрат, поэтому целесообразно решение поставленной задачи начать с математического моделирования, а затем путем численного эксперимента определить набор требований к материалу контейнера. Данная работа посвящена математическому моделированию динамических деформационных процессов в конструкции защитного контейнера вследствие детонационного внутреннего нагружения.

Постановка задачи и ее решение. Целью данной работы является создание адекватной реальному процессу математической модели, максимально учитывающей сложный физический характер деформирования. Предлагается защитный контейнер рассматривать как оболочку вращения, состоящую из трех частей. Первая часть – замкнутая цилиндрическая оболочка. Вторая и третья – полусферические днища. Предполагаем, что оболочка замкнутая, а отверстие люка существенно не влияет на ее прочностные свойства. Такая геометрия задачи приводит к необходимости отдельного изучения поведения цилиндрической и сферической частей. В узлах стыковки обязательно соблюдение условий совместности перемещений и деформаций. Симметрия конструкции позволяет упростить решение задачи за счет рассмотрения только одной из сферических оболочек. Таким образом, в плоскости окружности стыковки полусферы с цилиндром задаем начало координат – точку O . Из точки O проводим цилиндрические

координаты (r, φ, z) и сферические (r, φ, θ) так, чтобы они образовывали "правые тройки" и ось z совпадала с осью вращения составной оболочки.

Уравнения для компонент вектора перемещений запишем в рамках теории Тимошенко для оболочек и пластин [2]. Для цилиндрической части оболочки вектор перемещений $U_c = U(u, w, \beta)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\nu}{R_c} \frac{\partial w}{\partial z} &= c_1 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{\partial \beta}{\partial z} - b_1 \left(\frac{w}{R_c} + \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= c_2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - q(z, t), \\ \frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2} - b_2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} + \beta \right) &= c_1 \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $z \in [0, L]$, ν – коэффициент Пуассона, $c_1 = \frac{\rho(1-\nu^2)}{E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)}$,

$c_2 = \frac{\rho}{kG(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)}$, $b_1 = \frac{2}{(1-\nu)kR_c}$, $b_2 = \frac{6(1-\nu)k}{h^2}$, R_c – радиус сре-

динной поверхности цилиндра, h – толщина оболочки, k – коэффициент кривизны оболочки, $E = E(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ и $G = G(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$ – модули упругости при растяжении и сдвиге, зависящие от деформации ε , ее скорости $\dot{\varepsilon}$ и температуры T .

Значения модулей упругости для материала конструкции определяются экспериментально с учетом изменения физических характеристик в процессе деформирования [5].

Для сферической части составной оболочки уравнения движения в перемещениях $U_s = U(u, w, \beta)$ можно привести к виду

$$\begin{aligned} &\frac{E^2}{R_c^2} \operatorname{ctg} \omega \left[\frac{\partial^2 u}{\partial \omega^2} + \frac{\partial u}{\partial \omega} (1 + \nu) + \nu \left(\frac{\partial u}{\partial \omega} \operatorname{ctg} \omega - \frac{u}{\sin^2 \omega} \right) \right] \times \\ &\times \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \omega} - u \operatorname{ctg} \omega \right) \cdot (1 - \nu) \right] + \frac{kGh}{R_c} \left[\frac{\partial w}{\partial \omega} - u + R_c \beta \right] = \rho h R_c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ &\frac{kGh}{R_c} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial \omega^2} - \frac{\partial u}{\partial \omega} + R_c \frac{\partial \beta}{\partial \omega} + \operatorname{ctg} \omega \left(\frac{\partial w}{\partial \omega} - u + R_c \beta \right) \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{E}{R_c} \left[(1 + \nu) \left(\frac{\partial u}{\partial \omega} + u \operatorname{ctg} \omega - 2w \right) \right] = \rho h R_c \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - R_c p(\omega, t), \\
 & \frac{E h^2}{12 R_c} \left[\frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} + \nu \operatorname{ctg} \omega \frac{\partial \beta}{\partial \omega} - \nu \beta \frac{1}{\sin^2 \omega} + \operatorname{ctg} \omega \left(\frac{\partial \beta}{\partial \omega} + \beta \operatorname{ctg} \omega (1 - \nu) \right) \right] - \\
 & -k G h \left[\frac{\partial w}{\partial \omega} - u + R_c \beta \right] = \frac{\rho h^3 R_c}{12} \frac{\partial^2 \beta}{\partial t^2}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

где $\omega = \frac{z}{R_c}$, а R_c – радиус срединной поверхности сферы. Остальные обозначения совпадают с принятыми ранее.

$$\text{Начальные условия считаем нулевыми } U = \frac{\partial U}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0.$$

Граничные условия принимаются в зависимости от способа закрепления сферического купола. В узлах стыковки сферического купола с цилиндром $U_c|_{z=0} = U_s|_{z=0}$, для свободного края $\frac{\partial U}{\partial z} \Big|_{z=-R_c} = 0$, либо для защемления $U|_{z=-R_c} = 0$.

Параметры детонационной нагрузки $q(z, t) = Q_{\max}(z) e^{\frac{t-t_0(z)}{\theta(z)}} F_1(z, t)$ и $p(\omega, t) = Q_{\max}(\omega) e^{\frac{t-t_0(\omega)}{\theta(\omega)}} F_2(\omega, t)$ определяются экспериментальным путем [4].

Система шести уравнений (1) - (2), дополненная начальными и граничными условиями, позволяет определять поле перемещений конструкции, при этом деформационный процесс может протекать как в упругой, так и в пластической стадии. Связь между деформациями и перемещениями определяем следующим образом [1]

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{R_c} w, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial \beta}{\partial z}, \quad \varepsilon_{12} = \frac{\partial w}{\partial z} - \beta, \quad (6)$$

где ε_1 – деформация растяжения-сжатия срединной поверхности в продольном направлении, ε_2 – деформация растяжения-сжатия срединной поверхности в окружном направлении, ε_3 – деформация изгиба срединной поверхности в продольном направлении, ε_{12} – деформация сдвига в срединной поверхности.

Предложенный выбор зависимостей (6) позволяет рассматривать все части составной оболочки как единое целое, предварительно сделав замену $z = R_c \cdot \omega$ для сферических куполов.

Дальнейшее математическое моделирование задачи проводится с учетом того факта, что под действием детонационной нагрузки в материале развиваются зоны пластического деформирования с возможным образованием адиабатических полос сдвига [4]. Поэтому дальнейшее решение сводится к определению интенсивности деформаций $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t), \varepsilon_3(t), \varepsilon_{12}(t))$, а далее путем экспериментальных исследований находим зависимость для интенсивности напряжений материала оболочки $\sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i(t), \dot{\varepsilon}_i(t), T)$, где $\dot{\varepsilon}_i(t)$ - скорость деформаций, T - температура деформирующегося участка оболочки.

Интенсивность деформаций имеет вид [1]

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + \frac{2}{3} \varepsilon_{12}^2}, \quad (7)$$

а интенсивность напряжений определяется с учетом полученных экспериментально динамических характеристик материала [3]

$$\sigma_i = \sigma_s \left\{ \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] - \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} - \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_i}{D} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \right)^m \right\} \cdot \left(1 - \frac{T - T_k}{T_p - T_k} \right)^r, \quad (8)$$

где σ_s - статический предел текучести по напряжениям, ε_s - статический предел текучести по деформациям, D, n, m, r - экспериментальные параметры динамических свойств материала, T_k - температура, при которой проводилось определение характеристик материала, T_p - температура плавления материала.

Дальнейшее решение задачи проводится численными методами. В качестве примера была рассмотрена стальная (материал - сталь X18H10T) составная оболочка длиной $L = 1,22$ м, $R_c = 0,45$ м - радиус срединной поверхности, и толщи-

ной $h = 0,005$ м. Один сферический купол жестко закреплен, другой рассматривался как шарнирная опора. $Q_{\max}(z) = 9,5 \cdot 10^7$ Па. Определялось: напряженно-деформированное состояние составной конструкции, зоны максимальных напряжений, скорость движущейся границы зоны нагружения в момент достижения оболочки. Оценивалась прочность оболочки. Как правило, максимальная интенсивность напряжений наблюдается в центральной части конструкции и в сечениях заделки цилиндрической оболочки со сферическими куполами.

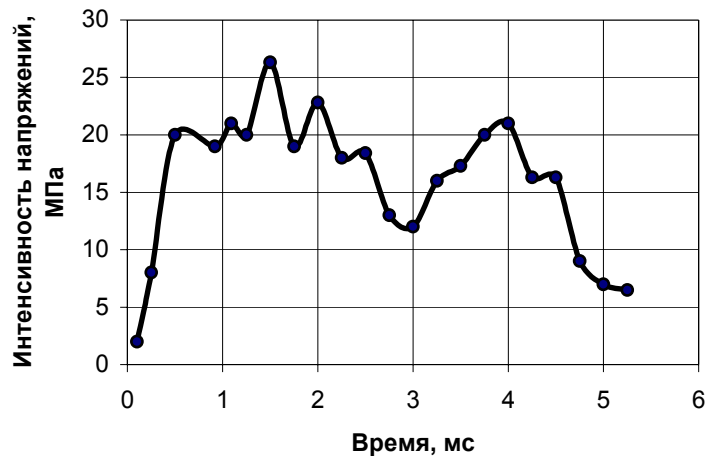


Рис. 1 – Интенсивность напряжений

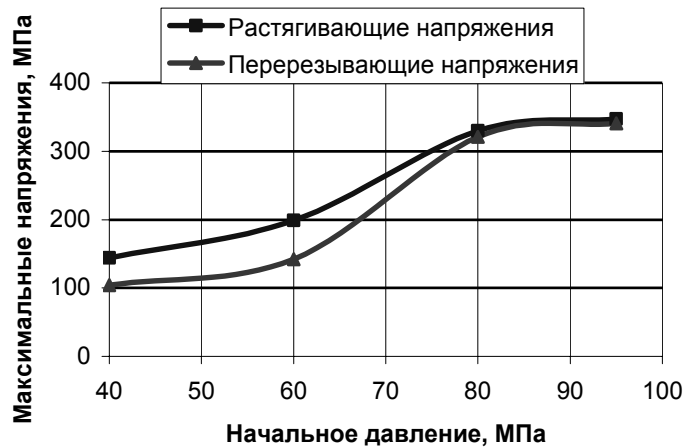


Рис. 2 – Уровень динамической нагрузки

На рис. 1 дана графіческая ілюстрація залежності інтенсивності напружень від часу в точці заделки. Хорошо спостерігається хвилюватий характер процесу деформування. Також потрібно відзначити швидке затухання хвилюватого процесу. Результати досліджень, представлені на рис. 2, дають можливість визначити рівень динамічної навантаження, при якому максимальні інтенсивності напружень не перевищують допустимих.

Висновки. Представлений метод дозволяє оцінити динамічну міцність і прогнозувати цілісність складової оболонки під дією внутрішнього детонаційного навантаження. Характерною особливістю запропонованого методу є врахування впливу швидкості деформації і температури при пластичному деформуванні.

Проведені чисельні дослідження встановили той факт, що найбільша ймовірність руйнування конструкції при деформації – в місці з'єднання її складових частин або в середині системи. Тому подальші дослідження необхідно направити на пошуки оптимальних розмірів конструкції, що забезпечують її повноцінне функціонування.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швидкісне деформування елементів конструкцій / Ю.С. Вороб'єв, А.В. Колодяжний, В.І. Севрюков, Е.Г. Янютин. - К.: Наук, думка, 1989. - 192 с.
2. Вороб'єв Ю.С. Об особливостях моделювання ударно-імпульсного навантаження оболонок і пластин / Ю.С. Вороб'єв, М.В. Чернобрывко // Механіка та машинобудування. – 2006.- № 1 - С. 39 - 45.
3. Чернобрывко М.В., Вороб'єв Ю.С. Швидкісне деформування захисних конструкцій під дією локальних імпульсних навантажень // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла. – Вип. 13, 2012. – С. 406-412.
4. Chernobryvko M.V. Method to Analyze the Effect of the Shock-Wave Loading on Building Elements / M.V. Chernobryvko, Y.S. Vorobyov, L. Kruszka // International Journal of Protective Structures. – Vol. 3, № 2, 2012. – P. 141-146.

5. Johnson G.R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures / G.R. Johnson, W.H. Cook // Engineering Fracture Mechanics. – 1985. – Vol.21, No 1. – P. 31 – 48.

Чернобрывко М.В., Світлична С.Д., Комяк В.М.

Проблеми забезпечення безпеки під час детонаційного впливу

Розглядається складова оболонка під дією внутрішньої ударно-хвильової навантаження. Досліджується напружено-деформований стан конструкції, поведінка матеріалу оболонки моделюється з урахуванням динамічних властивостей на основі експериментальних даних. Результати досліджень дозволяють вибирати умови навантаження, при якому конструкція зберігає свою працездатність.

Ключові слова: динамічна міцність, ударно-хвильове навантаження, швидкісне деформування, складена оболонка

Chernobryvko M.V., Svetlichna S.D., Komyak V.M.

Safety problems under detonation loading

The compound shell under action detonation loading is investigated. The deformation state condition taking into account. The mathematical model was developed with the result of experimental data. Investigation results are gives possibility to determine level of dynamics loading, at witch structure keep its cervice capacity. Results of researches allow to choose conditions of dynamic loading at which the design keeps the serviceability.

Key words: dynamic strength, shock-wave loading, high-speed deformation, the compound shell