

Также с помощью разработанной процедуры определена для первых пяти тонов колебаний значения частот и коэффициентов демпфирования колебаний (таблица 1).

Таблица 1

Номер тона	ω_y	ω_R	ω_E
1	2824,39	2819,30	1,20
2	3201,84	3200,00	0,67
3	4208,01	4201,20	1,54
4	5732,74	5729,40	1,22
5	6430,38	6426,40	1,35

Список литературы

- 1 **Мяченков, В. И.** Расчет составных оболочечных конструкций на ЭВМ / В. И. Мяченков, И. В. Григорьев. – М. : Машиностроение, 1981. – 216 с.
- 2 **Старовойтов, Э. И.** Деформирование трехслойных элементов конструкции на упругом основании / Э. И. Старовойтов, А. В. Яровая, Д. В. Леоненко. – М. : Физматлит, 2006. – 379 с.
- 3 **Абдусаттаров, А.** Деформирование и повреждаемости упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : Узбекистан, 2023. – 301 с.
- 4 **Карпов, В. В.** Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения : в 2 ч. Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения / В. В. Карпов. – М. : Физматлит, 2010. – 288 с.
- 5 **Абдусаттаров, А.** Деформирование составных оболочечных конструкций при переменном нагружении / А. Абдусаттаров, Т. Мавланов. – Ташкент : Фан, 1995. – 120 с.

УДК 539.3

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ТИПА ОБОЛОЧЕК ПРИ ПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ

А. АБДУСАТТАРОВ, Н. Б. РУЗИЕВА, Ф. Э. АБДУКАДЫРОВ

Ташкентский государственный транспортный университет, Республика Узбекистан

Введение. В работе [1] исследованы колебания подземных сооружений типа оболочек от сейсмических воздействий, решены задачи сейсмостойкости подземных оболочечных конструкций открытого и замкнутого профилей, постоянной и переменной толщин. В [2] описано состояние трубопроводов после землетрясений различной интенсивности, выявлены резервы прочности и надежности трубопроводов, предложены инженерные методы их расчетов на сейсмические воздействия. Обследование последствий землетрясений указывает на существенное влияние типа труб и их соединений на степень повреждения трубопроводов при землетрясениях.

Монография [3] посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию взаимодействия сооружений с грунтом. На основе результатов экспериментов построены локальные законы взаимодействия протяженных подземных сооружений с грунтами нарушенной и ненарушенной структур. В работе [4] согласно разработанной расчетной модели тонкостенного трубопровода большого диаметра в виде цилиндрической оболочки для прямых трубопроводов и тороидальной для криволинейных. В работе [5] содержится описание методов численного моделирования магистральных трубопроводных систем. Предложенные концепции и методы являются базовыми элементами теоретического фундамента современного компьютерного инструментария для эффективного решения широкого круга технических и технологических проблем проектирования сооружений и объектов трубопроводного транспорта. В статье [6] приведены экспериментальные и численные результаты анализа взаимодействия грунта и трубы. Отмечается, что взаимодействие грунта и ее структуры может быть использовано для улучшения планирования и проектирования подземных трубопроводов и снижения риска повреждаемости материала.

Рассматривается магистральный трубопровод как тонкостенная оболочка, который деформируется за пределами упругости при повторно-динамическом нагружении. Напряженно-деформированное состояние трубопровода для этого случая определяется на основе теории малых упругопластических деформаций А. А. Ильюшина [7]. Следуя работе [8], введем разности

$$\bar{e}_{ij}^{(n)} = (-1)^n (e_{ij}^{(n-1)} - e_{ij}^{(n)}); \quad \bar{U}_i^{(n)} = (-1)^n (U_i^{(n-1)} - U_i^{(n)}); \quad \bar{\sigma}_{ij}^{(n)} = (-1)^n (\sigma_{ij}^{(n-1)} - \sigma_{ij}^{(n)}). \quad (1)$$

Для определения компонентов перемещений $\bar{U}_i^{(n)}$ и деформаций $\bar{e}_{ij}^{(n)}$ при n -м нагружении имеем следующие соотношения [9]:

$$\bar{U}_\alpha^{(n)} = \bar{U}^{(n)} - \frac{\gamma}{A} \cdot \frac{\partial \bar{W}^{(n)}}{\partial \alpha}; \quad \bar{U}_\beta^{(n)} = (1 + k_2 \gamma) \bar{V}^{(n)} - \frac{\gamma}{B} \cdot \frac{\partial \bar{W}^{(n)}}{\partial \beta}; \quad \bar{U}_\gamma^{(n)} = \bar{W}^{(n)}(\alpha, \beta); \quad (2)$$

$$\bar{e}_{\alpha\alpha}^{(n)} = \frac{1}{R} \frac{\partial \bar{U}^{(n)}}{\partial \alpha} - \frac{\gamma}{R^2} \frac{\partial^2 \bar{W}^{(n)}}{\partial \alpha^2}; \quad \bar{e}_{\beta\beta}^{(n)} = \frac{\partial \bar{V}^{(n)}}{R \partial \beta} - (\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{\partial^2 \bar{W}^{(n)}}{R^2 \partial \beta^2} + (1 - k_2 \gamma + k_2^2 \gamma^2) k_2 \bar{W}^{(n)};$$

$$\bar{e}_{\alpha\beta}^{(n)} = (1 - k_2 \gamma + k_2^2 \gamma^2) \frac{\partial \bar{U}^{(n)}}{R \partial \beta} - (\gamma - k_2 \gamma^2) \frac{\partial^2 \bar{W}^{(n)}}{R^2 \partial \alpha \partial \beta} + (1 + k_2 \gamma) \frac{\partial \bar{V}^{(n)}}{R \partial \alpha} - \frac{\gamma}{R^2} \frac{\partial^2 \bar{W}^{(n)}}{\partial \alpha \partial \beta}. \quad (3)$$

При переменном нагружении компоненты напряжений и деформаций связаны в виде, например,

$$\sigma_{\alpha\alpha}^{(n)} = G_1 \left\{ \left(e_{\alpha\alpha}^{(n)} + \mu e_{\beta\beta}^{(n)} \right) - \left[\omega^{(n)} \left(\bar{e}_{\alpha\alpha}^{(n)} + \mu \bar{e}_{\beta\beta}^{(n)} \right) + \sum_{m=1}^{k-1} \omega^{0(n-m)} \left(\bar{e}_{\alpha\alpha}^{0(n-m)} + \mu \bar{e}_{\beta\beta}^{0(n-m-1)} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

При переменном нагружении для получения уравнения движения цилиндрической оболочки – магистрального трубопровода воспользуемся принципом Гамильтона – Остроградского:

$$\int_t (\delta T^{(n)} - \delta \Pi^{(n)} + \delta A^{(n)}) dt = 0. \quad (5)$$

Определяя выражение вариации кинетической $\delta T^{(n)}$, потенциальной энергии $\delta \Pi^{(n)}$ и работы внешних сил $\delta A^{(n)}$ и подставляя в (5), с учетом соотношения (3)–(4), получена системы уравнений движения трубопровода с соответствующими граничными и начальными условиями при повторно-динамическом нагружении. При решении краевой задачи используется метод конечных разностей второго порядка точности, и на основе применения центрально-разностных формул получена следующая система алгебраических уравнений [10]:

$$B_n U_{n,i-1}^{k+1} + C_n U_{n,i}^{k+1} + B_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{A}_n U_{n,i+1}^{k+1} + \bar{B}_n U_{n,i-1}^k + \bar{C}_n U_{n,i}^k + \bar{D}_n U_{n,i+1}^k + \bar{A}_n U_{n,i+2}^k + B_n U_{n,i-1}^{k-1} + C_n U_{n,i}^{k-1} + B_n U_{n,i+1}^{k-1} + \tau^2 F_{n,i}^k = 0. \quad (6)$$

Результаты расчета приведены в виде графиков (рисунок 1) и таблицы 1.

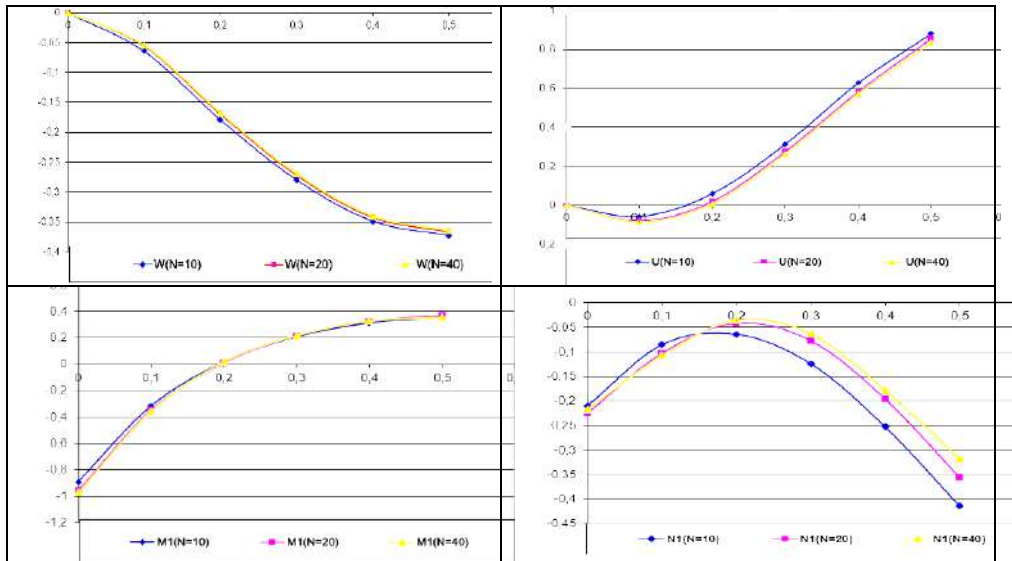


Рисунок 1 – Характер сходимости расчетных величин при различных значениях шага сетки h

Таблица 1 – Характер изменения расчетных величин по длине оболочки

α	$W \cdot 10^3$	$U \cdot 10^6$	M_1	M_2	N_1	N_2
0	0,0	0,0	-9,71608	-4,17511	-2,16607	-0,99421
0,1	-0,05403	-0,87381	-3,56012	-1,80509	-1,07511	-2,58409
0,2	-0,16721	0,06788	0,07746	-0,30733	-0,35142	-6,17013
0,3	-0,26960	2,62508	2,15907	0,63612	-0,63503	-10,11210
0,4	-0,34052	5,70209	3,28106	1,24514	-1,78410	-13,10121
0,5	-0,36473	8,34110	3,53810	1,58013	-3,17805	-14,11012

Результаты исследования НДС оболочки при нагружении показывают, что возникающие в трубопроводе пластические деформации локализованы в относительно узких зонах. Отметим, что разрушение трубопровода при нагружении определяется главным образом накоплением повреждений.

Список литературы

- 1 Мубаракوف, Я. Н. Сейсмостойкость подземных сооружений типа оболочек / Я. Н. Мубаракوف. – Ташкент : Фан. – 1987. – 190 с.
- 2 Гехман, А. С. Расчет, конструирование и эксплуатация трубопроводов в сейсмических районах / А. С. Гехман, Х. Х. Зайнегдинов. – М. : Стройиздат. – 1988. – 184 с.
- 3 Султанов, К. С. Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений / К. С. Султанов. – Ташкент : Фан. – 2016. – 392 с.
- 4 Соколов, В. Г. Колебания, статическая и динамическая устойчивость трубопроводов большого диаметра : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. Г. Соколов. – СПб., 2011. – 36 с.
- 5 Селезнев, В. Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В. Е. Селезнев, В. В. Алешин, С. Н. Прялов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МАКС Пресс, 2009. – 436 с.
- 6 Calvetti, F. Experimental and Numerical Analysis of Soil-Pipe Interaction / F. Calvetti, C. di Prisco, R. Nova // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2004. – № 130. – P. 1292–1299. – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:12\(1292\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:12(1292)) (date of access: 05.09.2025).
- 7 Ильюшин, А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – М. : Логос, 2004. – 388 с.
- 8 Москвитин, В. В. Циклические нагружения элементов конструкций / В. В. Москвитин. – М. : URSS, 2019. – 344 с.
- 9 Абдусаттаров, А. Деформирование и повреждаемость упругопластических элементов конструкций при циклических нагружениях / А. Абдусаттаров, Э. И. Старовойтов, Н. Б. Рузиева. – Ташкент : IDEAL PRESS, 2023. – 381 с.
- 10 Abdusattarov, A. Deformation and damage capacity of thin-walled rods and tubular conduits under alternating loading / A. Abdusattarov // Construction Mechanics, Hydraulics and Water Resources Engineering : International Scientific Conference, E3S Web of Conferences / ed. by D. Bazarov and N. Vatin (EDP Sciences Publishing, Les Ulis Cedex A, France). – 2023. – Vol. 401. – P. 03033–03052.

УДК 666.762+66.094.3+544.47

ОКИСЛЕНИЕ И КАТАЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УВТК НА ОСНОВЕ $(Me^{4+})B_2-SiC$ В СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ

А. Н. АСТАПОВ

Московский авиационный институт, Российская Федерация

Б. Е. ЖЕСТКОВ

Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Российская Федерация

В. А. ПОГОДИН

Московский авиационный институт (НИИ), Российская Федерация

Для оценки стойкости к окислению и каталитической активности ультравысокотемпературных керамик (УВТК) на основе системы $(Me^{4+})B_2-SiC$ ($Me^{4+} = Hf$ и/или Zr) проводили газодинамические стендовые испытания. Моделировали процессы термохимического взаимодействия образцов со скоростным высокоэнтальпийным потоком воздушной плазмы для условий полета перспективного возвращаемого летательного аппарата в атмосфере Земли на высоте 60–80 км. Испытания выполняли на тепловом стенде ФАУ «ЦАГИ» (г. Жуковский), оснащенном индукционным плазмотроном [1]. При проведении огневых экспериментов на поверхности УВТК были реализованы два уровня термодинамических температур: высокий ($T_w = 1750...1800$ °С) и ультравысокий ($T_w = 2500...2600$ °С).