

## Список литературы

- 1 Starovoirov, É. I. Resonant effects of local loads on circular sandwich plates on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2010. – Vol. 46, no. 1. – P. 86–93.
- 2 Starovoirov, É. I. Circular sandwich plates under local impulsive loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 8. – P. 945–952.
- 3 Starovoirov, É. I. Vibrations of circular sandwich plates under resonant loads / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko, A. V. Yarovaia // International Applied Mechanics. – 2003. – Vol. 39, no. 12. – P. 1458–1463.
- 4 Леоненко, Д. В. Колебания элементов авиационных конструкций, возбужденные тепловым воздействием / Д. В. Леоненко, Л. Н. Рабинский, Э. И. Старовойтов // Известия вузов. Авиационная техника. – 2016. – № 4. – С. 25–32.
- 5 Леоненко, Д. В. Радиальные собственные колебания упругих трехслойных цилиндрических оболочек / Д. В. Леоненко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2010. – № 3 (12). – С. 53–56.
- 6 Starovoirov, É. I. Thermoelastic bending of a sandwich ring plate on an elastic foundation / É. I. Starovoirov, D. V. Leonenko // International Applied Mechanics. – 2008. – Vol. 44, no. 9. – P. 1032–1040.
- 7 Старовойтов, Э. И. Термосиловое нагружение трехслойных пологих оболочек / Э. И. Старовойтов // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1989. – № 5. – С. 114–119.
- 8 Старовойтов, Э. И. Сопротивление материалов / Э. И. Старовойтов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 384 с.
- 9 Захарчук, Ю. В. Перемещения в круговой трехслойной пластине со сжимаемым наполнителем / Ю. В. Захарчук // Механика. Исследования и инновации. – 2017. – № 10 (10). – С. 55–66.
- 10 Захарчук, Ю. В. Влияние сжимаемости наполнителя на перемещения в трёхслойной круговой симметричной пластине / Ю. В. Захарчук // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2018. – № 2. – С. 14–27.
- 11 Козел, А. Г. Уравнения равновесия упругопластической круговой пластины на основании пастернака / А. Г. Козел // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 127–133.
- 12 Козел, А. Г. Влияние сдвиговой жёсткости основания на напряжённое состояние сэндвич пластины / А. Г. Козел // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2018. – № 6 (332). – С. 25–34.
- 13 Нестерович, А. В. Напряжения в круговой пластине типа Тимошенко при неосесимметричном растяжении-сжатии / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2018. – № 11 (11). – С. 195–203.
- 14 Нестерович, А. В. Напряженное состояние круговой трехслойной пластины при осесимметричном нагружении в своей плоскости / А. В. Нестерович // Механика. Исследования и инновации. – 2019. – № 12 (12). – С. 152–157.

УДК 539.37

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ ПОДАТЛИВОЙ НА ПОПЕРЕЧНЫЙ СДВИГ ДЛИННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПАНЕЛИ ОВАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Е. А. СТОРОЖУК

Институт механики им. С. П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

Композитные цилиндрические оболочки переменной кривизны находят широкое применение в различных отраслях техники как конструктивные элементы машин и приборов. Высокие требования к точности и достоверности результатов исследований указанных элементов конструкций требуют кроме учета действительных условий эксплуатации, также и учета особенностей их деформирования (деформаций поперечного сдвига).

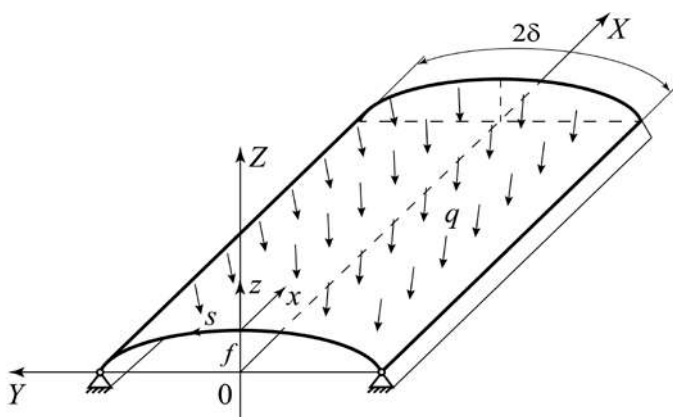


Рисунок 1 – Цилиндрическая панель овального поперечного сечения

Рассмотрим незамкнутую бесконечно длинную пологую цилиндрическую оболочку овального поперечного сечения постоянной толщины  $h$ , изготовленную из трансверсально-изотропного материала (рисунок 1). Для описания геометрии оболочки введем декартовую систему координат  $(X, Y, Z)$ , ось  $OX$  которой параллельна образующей. Плоскость поперечного сечения оболочки отнесем к системе координат  $(Y, Z)$ , а срединную поверхность – к криволинейной ортогональной системе координат  $(x, s)$ , сопряженной с линиями главных кривизн. Предполагаем, что оболочка имеет постоянные жесткостные характеристики  $D_N, D_M, D_Q$  и нагружена равномерным нормальным давлением интенсивности  $q = \text{const}$ . Из изложенного выше следует, что перемещения, деформации и напряжения в каж-

дом поперечном сечении оболочки будут одинаковыми, а все искомые величины будут изменяться только вдоль направляющей (будут зависеть только от координаты  $s$  ( $-\delta \leq s \leq \delta$ )).

Примем, что кривизна поперечного сечения оболочки изменяется по закону

$$k = \frac{1}{r_0} \left( 1 - \xi \cos \frac{2s}{r_0} \right), \quad (1)$$

где  $r_0 = \frac{a+b}{2}$  – радиус окружности, длина которой равна длине овала;  $a, b$  – полуоси поперечного сечения;  $\xi = \frac{3(a-b)}{a+b}$ .

Исходными при исследовании напряженно-деформированного состояния данного класса нетонких цилиндрических оболочек являются уравнения теории пологих оболочек, которая базируется на гипотезе прямой линии (учитываются деформации поперечного сдвига). В этом случае для геометрических соотношений имеем выражения:

$$\varepsilon = \frac{du}{ds} + kw; \quad \gamma = \vartheta + \frac{dw}{ds}; \quad \mu = \frac{d\vartheta}{ds}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon, \gamma, \mu$  – компоненты деформации оболочки;  $u, w$  – тангенциальное перемещение и прогиб точек срединной поверхности оболочки;  $\vartheta$  – угол поворота нормали.

Связь внутренних усилий ( $N, Q$ ) и момента ( $M$ ) с компонентами деформации оболочки записываем согласно закону Гука в виде:

$$\begin{aligned} N = D_N \varepsilon; \quad D_N = \frac{Eh}{1-\nu^2}; \quad Q = D_Q \gamma; \quad D_Q = m G_{yz} h; \\ M = D_M \mu; \quad D_M = D_N h^2 / 12. \end{aligned} \quad (3)$$

В соотношениях (3) обозначено:  $E, \nu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки в плоскости изотропии;  $G_{yz}$  – модуль сдвига в плоскости поперечного сечения;  $m$  – коэффициент, который зависит от характера распределения сдвига по толщине.

Уравнения равновесия имеют следующий вид:

$$\frac{dN}{ds} = 0; \quad \frac{dQ}{ds} - kN + q = 0; \quad \frac{dM}{ds} - Q = 0. \quad (4)$$

Интегрируя последовательно уравнения равновесия (4) и геометрические соотношения (2), получаем аналитическое (точное) решение данной задачи:

$$\begin{aligned} N = C_1; \quad Q = \frac{C_1}{r_0} \left( s - \frac{r_0 \xi}{2} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - qs + C_2; \quad M = \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^2}{2} + \frac{r_0^2 \xi}{4} \cos \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^2}{2} + C_2 s + C_3; \\ \vartheta = \frac{1}{D_M} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^3}{6} + \frac{r_0^3 \xi}{8} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^3}{6} + \frac{C_2 s^2}{2} + C_3 s \right] + C_4; \\ w = \frac{1}{D_Q} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( s - \frac{r_0 \xi}{2} \sin \frac{2s}{r_0} \right) - qs + C_2 \right] - \\ - \frac{1}{D_M} \left[ \frac{C_1}{r_0} \left( \frac{s^4}{24} - \frac{r_0^4 \xi}{16} \cos \frac{2s}{r_0} \right) - \frac{qs^4}{24} + \frac{C_2 s^3}{6} + \frac{C_3 s^2}{2} \right] - C_4 s + C_5. \end{aligned} \quad (5)$$

В соотношениях (5) не приведено выражение для тангенциального перемещения  $u$ , поскольку оно является громоздким и, как правило, не представляет практического интереса.

Постоянные интегрирования определяем из граничных условий на продольных краях оболочки.

Нормальные напряжения вдоль направляющей на внешней (верхней) и внутренней (нижней) поверхностях оболочки вычисляются по формулам:

$$\sigma^\pm = \frac{N}{h} \pm \frac{6M}{h^2} = \frac{C_1}{h} \pm \frac{6}{h^2} \left[ \frac{1}{r_0} \left( \frac{s^2}{2} + \frac{r_0^2 \xi}{4} \cos \frac{2s}{r_0} \right) C_1 - \frac{qs^2}{2} + C_2 s + C_3 \right]. \quad (6)$$

Отметим, что при  $D_0 \rightarrow \infty$  из формул (5) вытекает решение соответствующей задачи для оболочки Кирхгофа – Лява.

Таким образом, в работе получены точные выражения для обобщенных перемещений, нормальных напряжений, внутренних усилий и момента незамкнутой цилиндрической оболочки овального поперечного сечения при действии поверхностной нагрузки, которые имеют как самостоятельное значение, так и могут быть эталоном для приближенных и численных методов.

УДК 656.078

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

*Т. О. СУНДУКОВА, Г. В. ВАНЬКИНА*

*Тульский государственный педагогический университет им. Л. Н. Толстого, Российская Федерация*

Инновация на транспорте или новая категория, которая называется «интеллектуальный транспорт», «умный транспорт» (Smart Transportation), является одним из приоритетных направлений повседневной жизни, особенно в современной городской инфраструктуре, когда передовые технологии доступны почти каждому члену социума. Многие умные транспортные приложения становятся привычными, работают в любое время и обслуживают как водителей, так и пассажиров. В судоходном и авиационном секторах, которые в основном активно работают на международной арене, уже используются специализированные интеллектуальные транспортные системы. Каждая новая технология приносит с собой потребность в новом стандарте, мероприятия по стандартизации в наше время иногда не успевают за скоростью развития технологии [1]. В таких условиях соблюдение требований принятых стандартов имеет важное значение для эффективной работы, при этом развитие и обновление стандартов имеет важное значение для соблюдения требований.

Применение интеллектуальных транспортных систем в мировом масштабе и в каждой отдельной стране в основном сосредоточено на управлении автодорожным движением, обеспечении безопасности дорожного движения и автоматическом сборе сведений о логистике, транспортных потоках, загруженности магистралей, нарушениях. В последнее время на повестку дня встали заявки региональных муниципалитетов на поддержку систем общественного транспорта. Согласно международной дорожной Федерации (International Road Federation – IRF), цели интеллектуальной транспортной системы определяются следующим образом: безопасные дороги и безопасное вождение; достижение устойчивого автомобильного транспорта, сбор данных, передача данных, обработка и анализ; формирование и принятие решений [5]. В контексте поставленных целей существует ряд прямых и косвенных выгод, ожидаемых от интеллектуальной транспортной системы: снижение дорожно-транспортных происшествий; повышение безопасности и защищенности дорог, водителей и пешеходов; повышение эффективности работы транспортной системы и снижение пробок на дорогах; мониторинг, руководство и управление движением в режиме реального времени; оптимизация времени транспортировки и вклад в экономику за счет снижения транспортных издержек; повышения качества обслуживания и производительности труда; повышение личной мобильности и комфорта; минимизация ущерба, наносимого окружающей среде; экономия энергии. Перечисленные преимущества показывают важность интеллектуальной транспортной системы.

Рассмотрим основные концепции интеллектуальных транспортных систем.

**Концепция 1.** Передовые системы управления дорожным движением, собирающие и анализирующие данные о плотности движения и задержках в городских районах посредством установки дорожных камер и дорожных датчиков, которые будут передаваться в транспортные центры, чтобы уменьшить заторы в мегаполисах. Центры управления будут информировать водителей о неожиданных обстоятельствах, вызывающих заторы, и направлять их на наиболее подходящий маршрут для достижения пункта назначения самым быстрым способом через систему переменных сообщений, которая может предоставлять мгновенные сообщения в режиме реального времени. Динамические светофоры, управляемые на основе базы данных дорожных центров, обеспечат эффективный транспортный поток в перегруженных районах за счет использования мгновенной информации о дорожном движении в час пик и информации о техническом обслуживании дорог [3]. Динамическая система запрограммирует гибкое световое время для наиболее часто используемого перекрестка, изменение движения в часы пик, приоритизацию аварийных транспортных средств и автобусов.