

Видно, что кривую интенсивности изнашивания, полученную комбинацией механических характеристик ПВДФ [5], с достаточной точностью можно описать при помощи уравнения регрессии [3]. Следовательно, можно полагать, что между дозой облучения ПВДФ, изменением его механических характеристик и интенсивностью изнашивания существует не только некоторая статистическая связь, но эта связь с учетом единственности решения исходных уравнений носит причинно-следственный характер.

Из сравнения кривых [1] и [4] рисунок 2 видно, что интенсивность изнашивания кривой, полученной экспериментальным путем, несколько отличается от интенсивности изнашивания кривой, полученной расчетом. Однако необходимо отметить достаточно хорошее подобие в поведении кривых, что позволяет с высокой достоверностью выбрать дозу облучения для оптимизации прочностных и деформационных характеристик ПЭВП, не проводя длительного эксперимента. Располагая данными зависимости механических характеристик сшивающихся полимерных материалов от дозы облучения, можно прогнозировать ресурс изделия.

Относительно Ф-40П можно также по точке перегиба кривой [2] качественно определить необходимую дозу облучения для прогнозирования ресурса.

#### Список литературы

- 1 Влияние радиационного облучения на свойства полиолефинов и их смесей с другими полимерами / Л. М. Сергеева [и др.] // Полимерный журнал. – 2006. – Т. 28, № 4. – С. 271–283.
- 2 Влияние облучения на прочностные свойства стеклопластиков на основе полиэтиленовой матрицы / С. Р. Аллаярлов [и др.] // Химия высоких энергий. – 2005. – Т. 39, № 5. – С. 343.
- 3 Gel Fractions and Chain Reactions in Irradiated Polyethylenes / R. A. Jones [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1999. – Vol. B 151. – P. 213–217.
- 4 Триботехническое материаловедение и триботехнология : учеб. пособие / Н. Е. Денисова [и др.]; под общ. ред. Н. Е. Денисовой. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 250 с.
- 5 Gamma-Ray Irradiation Effect of Polyethylene on Dimaleimides as a Class of New Multifunctional Monomers / I. J. Lee [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. – Vol. 88. – P. 2339–2345.
- 6 Седов, Л. И. Механика сплошной среды. В 2 т. Т. 2 / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1984. – 560 с.
- 7 Влияние радиационного сшивания на интенсивность изнашивания поливинилиденфторида при трении в жидкости / В. П. Селькин [и др.] // Трение и износ. – 2008 (29). – № 1. – 58–63.
- 8 Смирнов, В. В. Радиационно-модифицированные полимерные композиты на основе полиолефинов для машиностроения : дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 / В. В. Смирнов. – Гомель, 1997. – 333 с.

УДК 539.31

### ФУНКЦИЯ ВЛИЯНИЯ ДЛЯ УПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА С ПОКРЫТИЕМ ТИПА МЕМБРАНЫ

*Э. И. СТАРОВОЙТОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Е. Ю. МИХАЙЛОВА*

*Московский авиационный институт (НИУ), Российская Федерация*

*Д. В. ТАРЛАКОВСКИЙ, Г. В. ФЕДОТЕНКОВ*

*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

При решении линейных динамических задач для деформируемых тел большую роль играют функции влияния. Они являются результатом решения задач при задании на границе деформируемого тела одной из компонент перемещения или напряжения в виде произведения дельта-функций Дирака по пространственным координатам и времени. Функция влияния для полупространства с покрытием типа мембраны является решением начально-краевой задачи о воздействии на мембрану, лежащую на поверхности упругого полупространства, сосредоточенной мгновенной нормальной нагрузки.

На мембрану, лежащую на поверхности упругого изотропного полупространства, воздействует сосредоточенное мгновенное нормальное давление вида  $p = \delta(\tau)\delta(x)$ . Контакт между мембраной и полупространством происходит в условиях свободного проскальзывания (рисунок 1). До начала взаимодействия полупространство и мембрана находятся в невозмущенном состоянии

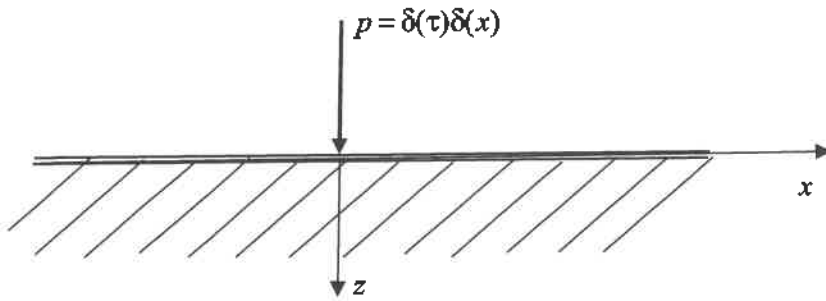


Рисунок 1

Положим, что полупространство занято однородной изотропной линейно-упругой средой с постоянными  $\lambda$ ,  $\mu$  и плотностью  $\rho$ . Введем прямоугольную декартову систему координат  $Oxyz$ , в которой координатная плоскость  $z=0$  совпадает с недеформируемой свободной поверхностью полупространства, и ось  $Oz$  направлена вглубь полупространства (см. рисунок 1.)

Математическая модель [1–3] включает в себя:

– уравнения движения упругой среды

$$\ddot{\phi} = \Delta\phi, \quad \eta^2 \ddot{\psi} = \Delta\psi, \quad \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}; \quad (1)$$

– соотношение, связывающее упругие потенциалы с отличными от нуля компонентами вектора перемещения  $u$  (вдоль оси  $Ox$ ),  $w$  (вдоль оси  $Oz$ ),

$$u = \frac{\partial\phi}{\partial x} - \frac{\partial\psi}{\partial z}; \quad w = \frac{\partial\phi}{\partial z} + \frac{\partial\psi}{\partial x}; \quad (2)$$

– соотношение, связывающее компоненты вектора перемещения и тензора напряжений,

$$\sigma_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} + \kappa \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \sigma_{22} = \kappa \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \right), \quad \sigma_{33} = \kappa \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \sigma_{13} = \frac{1-\kappa}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right); \quad (3)$$

– уравнение движения мембраны

$$\ddot{v}(\tau, x) = a^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + p + \sigma_{330}, \quad \sigma_{330} = \sigma_{33}|_{z=0}; \quad (4)$$

– начальные условия

$$v|_{\tau=0} = \dot{v}|_{\tau=0} = \psi|_{\tau=0} = \dot{\psi}|_{\tau=0} = \phi|_{\tau=0} = \dot{\phi}|_{\tau=0} = 0; \quad (5)$$

– граничные условия

$$\sigma_{13}|_{z=0} = 0, \quad v = w|_{z=0}; \quad (6)$$

– условия, характеризующие отсутствие возмущений в бесконечно удаленной точке,

$$\lim_{\kappa \rightarrow \infty} \phi = \lim_{\kappa \rightarrow \infty} \psi = 0, \quad r^2 = x^2 + y^2. \quad (7)$$

Все переменные и параметры приводятся к безразмерному виду (штрих соответствует размерным величинам):

$$\tau = \frac{c_1 t}{L}, \quad v = \frac{v'}{L}, \quad u = \frac{u'}{L}, \quad w = \frac{w'}{L}, \quad x = \frac{x'}{L}, \quad z = \frac{z'}{L}, \quad p = \frac{p' L}{c_1^2 \rho_m}, \quad a = \frac{a'}{c_1}, \quad c_1^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho_p}, \quad (8)$$

$$c_2^2 = \frac{\mu}{\rho_p}, \quad \eta^2 = \frac{c_1^2}{c_2^2}, \quad \phi = \frac{\phi'}{L^2}, \quad \psi = \frac{\psi'}{L^2}, \quad \sigma_{ij} = \frac{\sigma'_{ij}}{\lambda + 2\mu}, \quad k = \frac{\lambda}{\lambda + 2\mu},$$

где  $\rho_m$ ,  $\rho_p$  – плотность мембраны и полупространства;  $c_1$ ,  $c_2$  – скорости волн растяжения-сжатия и сдвига в упругом полупространстве;  $u'$ ,  $w'$ ,  $\phi'$ ,  $\psi'$ ,  $\sigma'_{ij}$  – тангенциальные и нормальные перемещения, потенциалы упругих смещений, компоненты тензора напряжений в полупространстве,  $v'$  – прогиб мембраны;  $L$  – характерный размер;  $a$  – скорость волны в мембране,

Для решения поставленной задачи к формулам (1)–(6) применяются преобразования Лапласа по времени и Фурье по координате  $x$ :

$$\begin{cases} -q^2\varphi^{FL} + \frac{\partial^2\varphi^{FL}}{\partial z^2} = s^2\varphi^{FL}, \\ -q^2\psi^{FL} + \frac{\partial^2\psi^{FL}}{\partial z^2} = \eta^2 s^2\psi^{FL}, \end{cases}$$

$$s^2v = -q^2 a^2 v^{FL} + 1 + \sigma_{330}^{FL}, \quad \sigma_{33}^{FL} = -iku^{FL} + \frac{\partial w^{FL}}{\partial z}, \quad (9)$$

$$w^{FL} = \frac{\partial\varphi^{FL}}{\partial z} - iq\psi^{FL}, \quad u^{FL} = -iq\varphi^{FL} - \frac{\partial\psi^{FL}}{\partial z},$$

$$\sigma_{13}^{FL} = \frac{1-k}{2} \left( \frac{\partial u^{FL}}{\partial z} - iqw^{FL} \right).$$

Решая данную систему уравнений, находим изображение функции влияния

$$v^{FL} = \frac{k_1(s, q)\eta^2 s^2}{k_1(s, q)[-a^2\eta^2 q^2 s^2 - \eta^2 s^4 + 2k_2 q^2(s, q)(k-1)] + (\eta^2 q^2 s^2 + 2q^4)(1-k) + \eta^2 s^4 + 2q^2 s^2}, \quad (10)$$

$$k_2(s, q) = \sqrt{q^2 + \eta^2 s^2}, \quad k_1(s, q) = \sqrt{q^2 + s^2}, \quad k_m(s, q) = \sqrt{s^2 + a^2 q^2}.$$

Оригинал функции влияния определяется с применением численно-аналитического алгоритма. При этом оригинал по Лапласу определяется аналитически, а по Фурье – численно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-58-00008 Бел\_а).

#### Список литературы

1 Михайлова, Е. Ю. Плоская нестационарная задача об ударе по мембране / Е. Ю. Михайлова, Д. В. Тарлаковский // Актуальные проблемы развития транспортных систем и строительного комплекса : тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2001. – С. 318–319.

2 Mikhailova, E.Yu. Nonstationary Axisymmetric Problem of the Impact of a Spherical Shell on an Elastic Half-Space (Initial Stage of Interaction) / E. Yu. Mikhailova, G. V. Fedotenko // Mechanics of Solids. – 2011. – Vol. 46, No. 2. – P. 239–247.

3 Михайлова, Е. Ю. Нестационарный контакт сферической оболочки и упругого полупространства / Е. Ю. Михайлова, Г. В. Федотенков, Д. В. Тарлаковский // Труды МАИ: электронный журнал. – 2014. – Вып. 78 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=53499>. – Дата доступа : 20.06.19.

УДК 629.5.01

## ПРИМЕНЕНИЕ И РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

*Э. И. СТАРОВОЙТОВ*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

*Ю. М. ПЛЕСКАЧЕВСКИЙ*

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

*М. Ю. РЯЗАНЦЕВА*

*НИИ механики МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*

Трехслойные конструкции широко применяются в технике, авиа- и судостроении, промышленности и строительстве. В интерьере современных пассажирских самолетов около 80 % конструкций самолета выполнены из трехслойных сотовых панелей, что объясняется их довольно высокой удельной прочностью и жёсткостью, по сравнению с традиционными монолитами. Это позволяет уменьшить толщину оболочек, панелей и число ребер жесткости и уменьшить массу конструкции, что приводит к экономии не только материалов, но и горючего.

Постепенный рост объемов производства авиационной техники ставит перед конструкторами задачу экономической эффективности при создании современного высокотехнологичного интерьера самолета. Элементы конструкции летательных аппаратов, выполняемые в виде многослойных конструкций, применяются для истребителя-перехватчика SAAB-37 «Вигтен», истребителя-бомбардировщика F-111A, пассажирского самолета Ил-96-300, космического корабля «Спейс шаттл».