

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ
ИМ. Н.С. ПОЛЯКОВА

GE
GE



ТЕХНИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
TECHNICAL MECHANICS

МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ СБОРНИК

НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ВЫПУСК 71

Днепропетровск

2007

УДК 622.002.5-762:678.001.04

Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 71. – 272 с.

У збірнику представлені результати наукових досліджень в галузі динаміки та міцності, механіки еластомерів, безпеки складних технічних систем та проблем стійкого розвитку.

Для наукових працівників, аспірантів і студентів старших курсів.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор, академик НАН Украины А.Ф. Булат (ответственный редактор), д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. НАН Украины Э.И. Ефремов (зам. отв. редактора), д-р техн. наук В.В. Виноградов (зам. отв. редактора), д-р техн. наук Б.А. Блюсс, д-р техн. наук, профессор Л.М. Васильев, д-р техн. наук А.И. Волошин, д-р техн. наук, профессор В.И. Дырда, д-р геол.-мин. наук В.В. Лукинов, д-р техн. наук В.П. Надутый, д-р техн. наук В.Г. Перепелица, д-р техн. наук А.С. Пригунов, д-р техн. наук К.К. Софийский, д-р техн. наук, профессор Б.М. Усаченко, д-р техн. наук, профессор М.С. Четверик

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Франчук В.П.
д-р техн. наук, проф. Виноградов В.В.

Ответственный за выпуск д-р техн. наук, проф. Дырда В.И.

Адрес редколлегии:

49005, ГСП, Днепропетровск-5, ул. Симферопольская, 2а
Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

Утверждено к печати Ученым Советом

Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины
(протокол № 3 от 05 марта 2007 г.)

ISSN 1607-4556

© ИГТМ НАН Украины, 2007

СОДЕРЖАНИЕ

Дырда В.И., Булат-Корнейчук Е.А. Интеллектуальная связь между философскими категориями пределов и критериями разрушения в контексте научных открытий. Ч. 1	3
Дырда В.И., Булат-Корнейчук Е.А. Интеллектуальная связь между философскими категориями пределов и критериями разрушения в контексте научных открытий. Ч. 2	15
Кобец А.С., Дырда В.И. Некоторые вопросы динамики сельскохозяйственных машин с нелинейными упругими звеньями	69
Кобец А.С., Кобец О.М. Результаты досліджень ударної в'язкості гички буряків при видаленні її еластичними робочими органами	75
Кобец А.С., Корабельский В.И., Сокол С.П., Демидов А.А. Саморазвёртывающаяся скоба с боковыми уширителями	78
Хорольський М.С., Бахмат В.О., Сабініна Л.А., Кіпкало І.В. Деякі теоретичні аспекти розробки ущільнювачів з антифрикційним покриттям для гідротехнічних споруд. Ч. 1	81
Хорольський М.С., Бахмат В.О., Сабініна Л.А., Кіпкало І.В. Деякі теоретичні аспекти розробки ущільнювачів з антифрикційним покриттям для гідротехнічних споруд. Ч. 2	86
Козуб Ю.Г. Расчет частот свободных колебаний конструкций из эластомеров	90
Козуб Г.А., Толоч В.А., Дохняк Б.М. Термомеханика крупногабаритных шин	95
Шевченко В.Г. Оценка энергозатрат и экономичности системы «машинист – выемочный комбайн» в процессе добычи угля	100
Лисица Н.И. Определение рациональных параметров роликов с виброизолированным корпусом	107
Гринбаум Ю.В., Лисица Н.И., Давыдов Л.И. Особенности процесса пуска ленточного конвейера	111
Дырда В.И., Маркелов А.Е. Структурно-синергетическая модель разрушения и расчет долговечности резиновой футеровки барабанных мельниц	117
Дохняк Б.М., Ищенко М.И. Алгоритм решения нелинейных задач инкрементальной теории упругости методом конечных элементов	139
Беседа А.А. Направления повышения эффективности посевных машин	148
Киричевский Р.В., Донченко В.Ю. Входной – выходной уровень информации в вычислительных комплексах ANSYS и MIPELA+	153
Мизерная Е.Л., Киричевский Вал.В. Моделирование напряженно-деформированного состояния композиционной балки с трещиной при испытании на трехточечный изгиб	160
Гребенюк С.Н., Мелашенко О.П. Определение прочностных характеристик композитной цилиндрической оболочки	163
Гребенюк С.Н., Мизерная Е.Л. Напряженное состояние защемленной по торцам многослойной резинокордной цилиндрической оболочки	166
Вабішевич М.О., Гуляр О.І., Солодей І.І. Дослідження вимушених коливань просторових неоднорідних призматичних тіл з тріщинами	170
Баженов В.А., Гуляр О.І., Пискунов С.О., Андрієвський В.П. Методика розв'язання	

просторових задач термов'язкопружнопластичності призматичних тіл з урахуванням пошкодженості матеріалу	178
Пискунов С.О., Мишук С.В., Шкриль О.О. Визначення напружено-деформованого стану тіл обертання із використанням кругового скінченного елемента змінної площі поперечного перерізу	198
Баженов В.А., Пискунов С.О., Шкриль О.О. Визначення додаткового ресурсу лопатки газової турбіни з тріщиною під дією циклічного навантаження	204
Гуляр А.И., Пискунов С.О., Сахаров А.С. Построение дискретного аналога инвариантного контурного интеграла для вычисления высвобождаемой энергии развития трещины	210
Мединцева Ю.В. Проблемы качества, долговечности и конкурентоспособности зубчатых передач и роликоподшипников	218
Решевская Е.С., Тархова В.М., Киричевский Р.В. Исследование контактного взаимодействия конического эластомерного виброизолятора	222
Пасичник А.А., Панченко Е.И., Богуцкая Е.А., Лотаков В.С. Некоторые особенности конструирования пресс-форм для вулканизации колец круглого сечения из жестких резин	226
Скоков О.І., Дяченко О.Г., Воловщикова В.В., Хорольський М.С. Дослідження деформаційних характеристик гумоармованих опорних частин, що компенсують статичні та динамічні навантаження елементів мостових споруд	230
Пасичник А.А., Лотаков В.С., Панченко Е.И., Богуцкая Е.А., Хорольський М.С. Конструктивные особенности и технология индивидуальной сборки клиновых ремней	233
Зайцева Т.П., Лотаков В.С., Богуцкая Е.А., Жиленко Н.В., Хорольський М.С. Применение фторкаучука типа «Viton» взамен каучука марки СКФ-26 в резинотехнических изделиях	236
Светличная Р.Ф., Богуцкая Е.А., Лотаков В.С., Хорольський М.С. Влияние длительного складского хранения резинотехнических изделий на их работоспособность в узлах и агрегатах машины	238
Решетникова Т.В., Румянцев В.В., Румянцева Т.Ю. Застосування методів термічного аналізу для оцінки якості каучуків	243
Румянцева Т.Ю., Лігай В.М., Румянцев В.В. Вивчення впливу блокованих поліізоціанатів на властивості гум на основі бутадієн-нітрильних каучуків	246
Мігіна Н.Є., Заїченко О.С., Братичак М.М., Політікова Л.Г. Синтез та властивості водно-дисперсійних плівкоутворювачів на основі кополімерів ненасиченої фракції C ₉ термолізу нафти	250
Сечін К.Л., Савчук О.Ф., Герашенко Є.І. Ефективність поверхневої та дифузійної модифікацій ущільнювачів, що працюють в повітрі високого тиску та вивчення розподілу стабілізатора в гумах на основі СКН-18 і СКЕП-50	254
Скоков А.И., Дяченко А.Г., Беспалова Л.В., Политаева Д.Л., Каплун С.В. Манжетные уплотнители поршней буровых насосов с повышенным ресурсом работоспособности	259
Сечін К.Л., Савчук О.Ф., Герашенко Є.І. Дослідження впливу дрібнодисперсного активного гумового порошку на властивості гуми на основі СКМС-30 АРКМ-15	263

Національна Академія Наук України
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

Наукове видання
ГЕОТЕХНІЧНА МЕХАНІКА
Міжвідомчий збірник наукових праць
Заснований у 1993 р.
Випуск 71 (російською мовою)

Відповідальний за випуск *В.І. Дирда*
Комп'ютерна верстка та підготовка макету ТОВ «Елвіта»
Підписано до друку 08.09.2007 р.
Формат 60×84/16. Умовн. друк. арк. 25
Тираж 300 примірників. Віддруковано «Авантаж»
49000, м. Дніпропетровськ, вул. Комсомольська, 22/6

- дослідження для підтвердження роботоздатності УАП;
- розроблення нормативно-технічної документації на новий тип ГТВ.

Виконання цієї науково-дослідної і конструкторсько-технологічної роботи зі створення і впровадження у виробництво нового типу гумового технічного виробу дозволить вирішити питання забезпечення будівництва нових та реконструкції існуючих гідротехнічних споруд України вітчизняними конкурентоспроможними ГТВ. Опанування виробництва УАП значно підвищить експортну складову національної гумотехнічної продукції.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская У.С. Фторопласти. – Л.: Химия, 1978.
2. Свойства и применение защитных покрытий на основе фторлонов и фторлоно-эпоксидных композиций / Тризно В.Л., Бугоркова Н.А., Бляхман Е.М. и др. – Л.: ЛДНТИ, 1975. – 21 с.
3. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов. – М.: Наука, 1977. – 77 с.
4. Каталог «Фторопласти». – Черкассы: НИИТЭХИМ, 1983. – 210 с.

УДК 531.624

Козуб Ю.Г.

РАСЧЕТ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЭЛАСТОМЕРОВ

Розглянуто скінченно-елементну методику розв'язання задач коливань попередньо навантажених еластомерних конструкцій.

CALCULATION OF FREQUENCIES OF FREE VIBRATIONS OF CONSTRUCTIONS FROM ELASTOMERS

The finite element method of decision of tasks of vibrations of the preliminary loaded elastomer constructions is considered.

Введение. В настоящее время все более широкое применение находят конструкции из эластомеров и композитов на их основе. Деформируемость эластомеров является их важнейшей эксплуатационной характеристикой. Как правило, в реальных условиях эксплуатации эластомерные элементы конструкций находятся в условиях динамического нагружения. Прогнозирование динамических свойств таких конструкций на этапе проектирования является достаточно актуальной задачей [1-10].

Проведение экспериментальных исследований требует достаточно большого времени и достаточно больших ресурсов. Поэтому актуальным является создание математических моделей поведения эластомерных конструкций. Основной проблемой при создании моделей является описание таких свойств эластомеров, как геометрическая и физическая нелинейность, слабая сжимаемость. Кроме того, технология изготовления и монтажа эластомерных элементов конструкций такова, что изначально в массиве эластомера возникают начальные напряжения.

Одним из наиболее эффективных методов решения задач упругости и вязкоупругости конструкций из эластомеров является метод конечных элементов (МКЭ) [3,7]. В настоящее время существует достаточно большое количество коммерческих пакетов прикладных программ расчета конструкций на основе

МКЭ. Однако практически ни в одном из них не реализована модель эластомера как слабосжимаемого материала.

Цель работы. Разработка эффективной методики решения задач динамики эластомерных конструкций является основной целью данной работы.

Материалы исследования. При решении задач теории упругости методом конечных элементов наиболее важным этапом является построение матрицы жесткости. Описание поведения слабосжимаемых эластомеров принимается на основе обобщенного закона Гука [10]

$$\sigma_{ij}^y = 2\mu \left[g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl} - \frac{1}{3} J_1(\hat{\varepsilon}) \right] + B \left(\sqrt{I_3(G^r)} - 1 \right) g^{ij},$$

где $B = \frac{2}{3} \mu + \lambda$ – модуль объемного сжатия.

Для учета слабой сжимаемости используется тройная аппроксимация полей перемещений, деформаций и функции изменения объема [3]

$$u_k = \sum_{pqr} \omega_k^{pqr} \psi^{pqr}, \quad \varepsilon_{ij} = \sum_{pqr} e_{ij}^{pqr} \psi^{pqr}, \quad \theta = \sum_{p=0}^{l-1} \sum_{q=0}^{m-1} \sum_{r=0}^{n-1} \xi^{pqr} \psi^{pqr},$$

где ψ^{pqr} – базисные полиномиальные функции специального вида [9], связанные с функциями формы конечного элемента соотношением

$$\{N\} = [A]\{\psi\};$$

N – функции формы КЭ;

A – матрица преобразования.

При монтаже и эксплуатации эластомерных конструкций создаются начальные напряжения и/или начальные перемещения. В этом случае матрица жесткости строится на основе инкрементальной теории Лагранжа [4, 5]:

$$[K] = [K_y] + [K^\sigma] + [K^u], \quad K_{ij} = \iiint_V C_{klmn} N_{ki,j} N_{ml,n} dV, \quad K_{ij}^\sigma = \iiint_V \sigma_{kl} N_{ki,j} N_{ml,n} dV,$$

$$K_{ij}^u = \iiint_V C_{klmn} (u_{r,k} \delta_{im} + u_{s,m} \delta_{rk} + u_{r,k} u_{s,m}) N_{ki,j} N_{ml,n} dV,$$

где $[K_y]$, $[K^\sigma]$, $[K^u]$ – инкрементальная матрица жесткости и матрицы жесткости, обусловленные начальными напряжениями и начальными перемещениями соответственно.

Для решения задач динамики эластомерных конструкций могут использоваться два подхода. Основаны эти подходы на основных методах интегрирования дифференциальных уравнений нестационарных процессов. Выбор метода решения зависит от характера динамического нагружения.

В случае периодического нагружения решение уравнений динамики проще определить в виде наложения различных мод собственных и вынужденных колебаний.

В случае импульсного или непериодического нагружения оптимальным является использование различных схем конечно-элементной дискретизации задачи во временной области [6].

Как правило, в реальных условиях эксплуатации эластомерные конструкции находятся в условиях периодического нагружения, поэтому задачи динамики сводятся к решению обобщенной проблемы собственных векторов и собственных значений.

В общем случае вековое уравнение имеет вид:

$$(K + \omega C + \omega^2 M)u = 0,$$

где C – матрица демпфирования;

M – матрица масс конструкции.

В большинстве случаев влияние демпфирования на частоты и формы собственных колебаний невелико и им можно пренебречь

$$(K + \omega^2 M)u = 0.$$

При построении матрицы масс можно использовать те же функции формы, что и при аппроксимации координат и перемещений:

$$M = \iiint_V \rho \{N\}^T \{N\} dV.$$

Другой подход при построении матрицы масс состоит в непосредственном распределении массы в узлы конечно-элементной сетки.

Решение полной проблемы собственных чисел может быть получено с помощью различных методов.

Практическую ценность имеют низшие значения собственных частот. В тех случаях, когда матрица жесткости имеет большой порядок, рациональнее использовать приближенные методы определения минимальных собственных значений. Одним из таких методов является степенной алгоритм [7]:

$$Ku_{(n+1)} = Mu_{(n)}.$$

Вектор начального приближения выбирается с учетом кинематических ограничений, накладываемых на конструкцию.

Минимальная собственная частота в этом случае может быть определена по формуле

$$\omega^2 \approx \frac{u_{(n)}^T K u_{(n)}}{u_{(n)}^T M u_{(n)}}.$$

Используя М-ортогональность собственных векторов можно сократить порядок системы уравнений и затем определить следующее собственное значение.

На основе рассмотренных подходов решен ряд задач вычисления собственных частот конструкций.

Задача 1. Определение низших частот свободных колебаний заземленной по одной грани квадратной пластины. В таблице 1 приведены результаты расчета в виде безразмерных коэффициентов

$$k_i = \frac{\omega_i a^2 \sqrt{\rho h}}{\sqrt{Dg}},$$

где a, h – размеры пластины;

D – цилиндрическая жесткость;

g – ускорение свободного падения;

ρ – плотность материала.

Таблица 1 – Относительные коэффициенты k_i

	Коэффициенты k_i		
	k_0	k_1	k_2
Аналитическое решение	35,9	73,4	108,2
Численное решение [7]	35,42	71,01	104,01
Численное решение	36,3	73,9	109,1

Задача 2. Прямоугольный призматический виброизолятор. Линейные размеры: $L = 0,1$ м, $B = 0,2$ м, $H = a \cdot L$. Виброизолятор работает на растяжение-сжатие по направлению H . Физические характеристики материала: плотность $\rho = 1200$ кг/м³, модуль сдвига $G = 1,231$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,499$. В табл. 2 приведены значения безразмерной величины $\Omega = \omega L \sqrt{\rho/G}$, соответствующие низшим собственным частотам для различных значений безразмерной высоты a , а также решения представленные в работе [6]. В табл. 3 представлены результаты расчета низшей собственной частоты для призмы $H/L = 0,8$ с начальным смещением нагружаемых граней $u_0 = \lambda H$.

Таблица 2 – Низшие собственные частоты призмы

	Ω/a			
	0,4	0,5	0,6	0,7
Ω_0 [8]	10,955	8,763	7,304	6,266
$\approx \Omega_0$	10,516	8,528	7,147	6,146

Таблица 3 – Зависимость частоты от предварительного поджатия

	λ			
	0,03	0,05	0,1	0,15
ω/ω_0	1,12	1,14	1,21	1,25

Задача 3. Рассмотрим сплошной цилиндрический виброизолятор, нагружение которого соответствует граничным условиям $u_r = 0$, $u_z = \pm a_0 R \cos \omega t$, $z = \pm H$, $r = R$. Значения первой безразмерной резонансной частоты $\Omega = \omega R \sqrt{\rho/G}$ для различных типоразмеров виброизолятора $a = H/R$ приведены в табл. 4.

Результаты расчета собственных частот колебаний для цилиндра при $\alpha=0,8$ при различных начальных смещениях $u_0 = \lambda H$ приведены в табл. 5.

Таблица 4 – Низшие собственные частоты цилиндра

Ω/a	0,3	0,4	0,5	0,6
$\Omega_0 [8]$	14,556	10,915	8,739	7,301
$\approx \Omega_0$	14,232	10,553	8,487	7,173

Таблица 5 – Зависимость частоты от предварительного поджатия

ω/ω_0	λ			
	0,03	0,05	0,1	0,15
	1,132	1,163	1,227	1,262

Анализ полученных результатов показывает, что рассмотренная методика позволяет получить достаточно точные результаты. Данная методика реализована в виде подсистемы ДИНЭМА в рамках вычислительного комплекса «МРЕЛА+» [9].

Выводы. Применение инкрементальных теорий для решения задач динамики конструкций из эластомеров позволяют получить достаточно точные результаты. При этом рассмотренная методика позволяет прогнозировать значения динамических характеристик эластомерных элементов конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потурев В.Н., Дырда В.И., Круш И.И. Прикладная механика резины. – К.: Наук. думка, 1980. – 260 с.
2. Дымников С.И. Расчет резиновых элементов конструкций. – Рига: Зинатне, 1991. – 277 с.
3. Киричевский В.В. Обобщение моментной схемы конечных элементов для исследования конструкций из слабосжимаемых эластомеров // Проблемы прочности. – 1985. – №11. – С. 105-110.
4. Василду К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
5. Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Расчет предварительно напряженных конструкций из эластомеров // Тр. 13-го Симп. «Проблемы шин и резинорезиновых композитов». г. Москва, 14-18 окт. 2002 г. – М.: НИИШП, 2002. – С. 119-123.
6. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимации. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
7. Метод конечных элементов в механике твердых тел / Сахаров А.С., Кислоцкий В.Н., Киричевский В.В. и др. – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
8. Сенченков И.К., Червинко О.П. Справочные частоты и напряжения призматических и цилиндрических виброизоляторов при кинематическом растяжении-сжатии // Вопросы динамики и прочности. – 1987. – Вып. 48. – С. 20-22.
9. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МРЕЛА+». / Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. и др. – К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.
10. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Метод конечных элементов в механике разрушения эластомеров. – К.: Наукова думка, 1998. – 200 с.

ТЕРМОМЕХНИКА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ШИН

Представлено методика розв'язання зв'язаної задачі термопружності для багатосарової резинорезинної конструкції методом скінчених елементів.

THERMOMECHANICS OF HEAVY-DUTY TYRES

A method decision of the linked task of thermoelasticity for a multi-layered rubber-cord construction the method of eventual elements is presented.

Введение. На сегодняшний день на открытых горных работах, на горно-рудных карьерах используют в основном карьерные автосамосвалы большой грузоподъемности, адаптированные к различным условиям бездорожья, что приводит к необходимости создания и усовершенствования крупногабаритных шин (КГШ) повышенной эксплуатационной производительности.

Проблема создания КГШ с высокими технико-экономическими показателями требует тщательного изучения их прочности на этапе проведения проектных работ. Высокая стоимость испытаний грузовых шин, их длительность, значительные габариты конструкции, недостатки и несовершенство экспериментального оборудования, обуславливают необходимость создания новых и дальнейшего усовершенствования существующих методик, с помощью которых можно в эксплуатационных условиях прогнозировать поведение шины и оценить степень ее дальнейшей работоспособности.

При проектировании новых перспективных моделей важное место в практической работе занимает исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) шин, подверженных локальным эксплуатационным нагрузкам. Решение таких задач не может осуществляться без ясного представления о характере распределения усилий в нитях корда и об особенностях деформирования наиболее ответственных элементов шины при термосиловых воздействиях. Усталостные разрушения резин и композитов, являются основной причиной, ограничивающей срок службы шин и других резинотехнических изделий, работающих в условиях многократных циклических нагрузок. Это не позволяет реализовать ресурс шины по износостойкости протектора и делает их непригодными для последующего восстановительного ремонта. При изготовлении шины также возможно появление внутренних дефектов, увеличивающихся в процессе эксплуатации, что в результате служит причиной ее внезапного разрушения. Тепло при работе шины выделяется в результате внутреннего трения в материале шины, трения между частицами воздуха в камере, а также трения в контакте с дорогой. Процессы тепловыделения при работе автомобильной шины исследовались в работах [1-6]. Основным недостатком существующих моделей является использование упрощающих гипотез о напряженно-деформированном состоянии шины.

Цель работы. Основной целью данной работы является разработка эффективной методики моделирования процессов деформирования и теплообразования в пневматических шинах в трехмерной постановке.

Материалы исследования. Температура окружающего воздуха и дорожных тепловые характеристики, тип дорожного покрытия и влажность опорной поверхности, то есть условия эксплуатации влияют на процессы тепловыделения и теплообмена в шинах. Но эти факторы составляют случайный внешний фон, который в равной мере определяет термонапряженное состояние шин любой конструкции и их различного технического состояния, а потому в данной работе не учитываются.

Следует отметить, что крупногабаритные шины подвержены значительным механическим повреждениям, это приводит к тепловым отслоениям из-за появления разрушений в подканавочной части протектора. Локальное повреждение беговой части протектора вызывает образование дефекта в подканавочном слое плечевой зоны, что ведет к процессу отслоения. В результате трения по месту дефекта, развивается еще более высокая температура, которая приводит к термомеханической деструкции резины и отслоениям.

Значительную роль в динамике тепловых процессов шины имеют ее эксплуатационные параметры: внутреннее давление, вертикальная нагрузка, скорость. Например, по мере нагрева шины в процессе движения давление воздуха в ней повышается, а сопротивление качению уменьшается.

Определяющее влияние на количество выделяемой, рассеиваемой и, в небольшой степени, поглощаемой тепловой энергии оказывает конструкция шины. Так, сопротивление движению колеса и, соответственно, выделение тепла возрастает с увеличением толщины протектора шины [4]. На твердых гладких покрытиях дорог шестислойные шины преобразуют в тепло и рассеивают примерно на 5 % механической энергии больше, чем трехслойные [4]. В местах профиля шины, где больше массив резины и больше деформации, тепловыделение увеличивается [6].

Анизотропия деформативных свойств, низкая сдвиговая жесткость, неоднородность и другие специфические факторы при расчете многослойных перекрестно армированных оболочек приводит к недопустимым погрешностям, искажающим напряженное состояние конструкции, особенно на границе раздела слоев. Исследование эффекта анизотропии сопряжено с большими трудностями даже в задачах осесимметричной деформации перекрестно армированных оболочек, так как в этом случае приходится интегрировать полную систему дифференциальных уравнений



Рис. 1 – Схема решения связанной задачи термоупругости

десятого порядка в теории оболочек типа Тимошенко и двенадцатого порядка в уточненной теории [7]. Учитывая сложность связанной термоупругой модели работы шины наиболее корректным способом ее решения представляется метод последовательных приближений (рис. 1), основанный на методе конечных элементов (МКЭ).

Рассмотрим процесс определения температуры диссипативного разогрева (саморазогрева) конструкций из эластомеров как решение связанной задачи термоупругости для установившегося режима циклического деформирования и теплообмена с окружающей средой.

Задачу упругости в конечноэлементной формулировке можно записать в виде:

$$[K^{\psi}] \{u_i\} = \{P^j\}, \quad (1)$$

где вектор правой части $\{P^j\}$ определяется по матрице жесткости $[K^{\psi}]$ и граничным условиям в виде перемещений на поверхности КЭ.

Для определения мощности внутренних источников теплообразования необходимо определить величину рассеянной энергии за цикл нагружения. В общем случае удельная величина рассеянной энергии равна сумме потерь энергии в армирующем волокне и связующем с учетом их объемного содержания

$$\Delta W = \mu \Delta W_c + (1 - \mu) \Delta W_r, \quad (2)$$

где μ – объемное содержание армирующего материала.

Использование простейших гипотез об однородности поля перемещений в направлении армирования и однородности поля обобщенных сил для сдвиговых напряжений и напряжений, нормальных к волокнам, позволяет вычислять мощность внутренних источников теплообразования как осредненную величину для k -го слоя, равную диссипированной энергии:

$$w_0^{(k)} = \Delta W^{(k)} = [\sigma^{(k)}]^T [\Psi_k^0] [\varepsilon^{(k)}], \quad (3)$$

где $[\sigma^{(k)}]$, $[\varepsilon^{(k)}]$ – тензор напряжений;

$[\Psi_k^0]$ – тензор упругодиссипативных характеристик композита в системе

координат армирования слоя.

Для определения температурных полей в момент наступления теплового равновесия между конструкцией и окружающей средой необходимо решить задачу теплопроводности. Уравнение стационарной теплопроводности для анизотропного тела можно представить в виде

$$\iiint_V \lambda^{\psi} T_{,j} T_{,j} g_{ij} dV + \iiint_V w_0 T dV + \iint_S [q + h(T - \theta)] T dS = 0, \quad (4)$$

где λ^{ψ} – тензор теплопроводности;

q – интенсивность тепловых потоков;

h – коэффициент теплопередачи;

θ – температура окружающей среды.

Из решения задачи стационарной теплопроводности (4) определяется поле температур $\{T\}$.

В общем случае физикомеханические характеристики материала зависят от температуры. В этом случае задача теплопроводности становится нелинейной, так как матрица $[H]$ и вектор эквивалентной тепловой нагрузки $\{R\}$ становятся зависимыми от температуры.

Система разрешающих уравнений стационарной теплопроводности с использованием метода последовательных приближений записывается в виде

$$[H(T_{(k-1)})]\{T_{(k)}\} = -\{R_{(k-1)}\}. \quad (5)$$

Итерационный процесс решения задачи продолжается до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность вычисления ε по условию

$$\left| \frac{\{T_{(k)}\} - \{T_{(k-1)}\}}{\{T_{(k)}\}} \right| \leq \varepsilon. \quad (6)$$

Для достижения заданной точности обычно достаточно двух-трех итераций.

Окончательно напряженно-деформированное состояние конструкции определяется на основе решения уравнения термоупругости при полученных температурных нагрузках.

Для построения конечно-элементной модели пневматической шины следует учесть ее основные конструктивные особенности. Каркас крупногабаритной шины составляет ее силовую основу и выполняется из нескольких десятков пар перекрестно армированных резинокордных слоев. Исходным материалом для корда служат вискозные и полиамидные волокна, модуль упругости которых принимается равным 1,5 ГПа (рис. 2). Угол армирования меняется от точки к точке по меридиану, достигая на экваторе 45-65°, в зависимости от типа и назначения шины. Для крупногабаритных шин типа 40.00-57 угол армирования принят равным 53°.

Бреккер, расположенный в беговой части шины, изготавливают из разреженных резинокордных слоев, собранных в пакете перекрестным образом. Под слоями брекера и нередко над ним прокладывают однородные прослойки из мягкой эластичной резины. Основное назначение брекера состоит в предохранении каркаса от механических повреждений, снижении нагрузок, передаваемых от дороги на каркаса через брекер, улучшении связи между каркасом и протектором. Частота армирования каркаса составляет 9 см^{-1} , а для брекера 7 см^{-1} .

Протектор представляет собой массивный слой резины и выполняется из жестких износостойчивых ре-

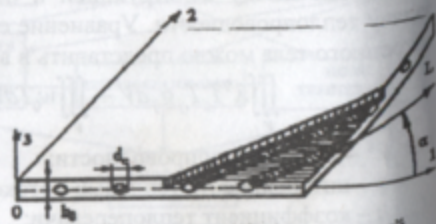


Рис. 2 – Элементарный анизотропный резинокордный слой

зин, работающих в предельно тяжелых условиях. На боковине протектор переходит в достаточно тонкий резиновый слой, основное предназначение которого – защита каркаса от внешних повреждений.

Предполагается, что поле перемещений и температур является сплошным и между слоями выполняются условия идеального теплового контакта. Для моделирования термоупругого поведения слоистой конструкции используется субпараметрический конечный элемент [8, 9] на базе вычислительного комплекса «МПРЕЛА+» [10].

На рис. 3 – рис. 6 приведены результаты решения задачи термоупругого деформирования шины типа 40.00-57 с учетом диссипативного разогрева. Максимальный прогиб нагруженной шины при обжатии на плоскость принимается равным 0,1 м. Давление воздуха внутри шины составляет 0,6 МПа. Скорость движения составляет 25 км/ч. Наиболее высокая температура разогрева шины наблюдается вблизи кромок брекера и составляет 123 °С.

Выводы. Реализация разработанной модели расчета ресурса шин и ее термоупругого поведения на стадии проектирования способствует созданию более рациональных конструкций.

Предложенная методика моделирования термомеханического поведения шин позволяет исследовать напряженно-деформированное и тепловое состояние конструкций при реальных эксплуатационных режимах нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хромов М.К., Бруев Э.В., Грачева Э.И. О влиянии теплового состояния шин на их работоспособность // Каучук и резина. – 1971. – № 6. – С. 39-42.
2. Ларин А.Н., Школьный С.М. Применение метода конечного элемента для расчета теплового состояния шины // Вестник Харьковского государственного политехнического университета: Сб. науч. тр. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 104. – С. 11-14.
3. Гуслицер Р.Л., Силецкий В.С., Мороз Т.Г. Зависимость теплового состояния шин для автомобиля ВАЗ 2101 от режима качения // Каучук и резина. – 1971. – № 4. – С. 41-43.
4. Третьяков О.Б., Гудков В.А., Тарновский В.Н. Трение и износ шин. – М.: Химия, 1992. – С. 176.

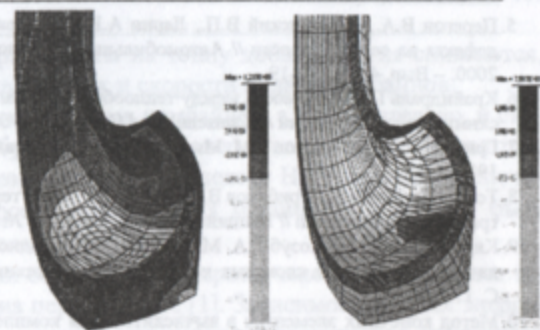


Рис. 3 – Распределение напряжений σ_{11}

Рис. 4 – Распределение напряжений σ_{12}

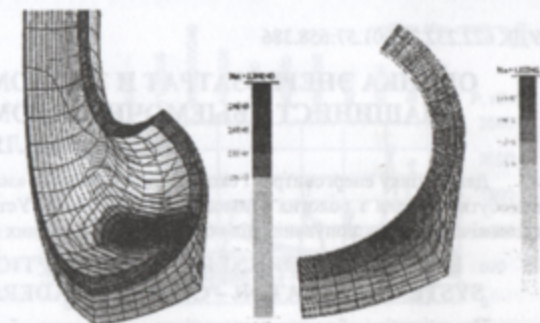


Рис. 5 – Распределение напряжений σ_{23}

Рис. 6 – Распределение температур

5. Перегон В.А., Ольшанский В.П., Ларин А.Н. Температурное поле боковины шины в области дефекта на ее поверхности // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. – Харьков: ХГАДП. 2000. – Вып. 4. – С. 17-19.
6. Крайндраль П. Зависимость между теплообразованием в грузовых шинах 11.00-20 и динамическими свойствами резины // Kautschuk und Gummi. – 1966. – № 1. – С. 21-36.
7. Григоров Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. – М.: Машиностроение. 1988. – 288 с.
8. Толоч В., Козуб Г., Грибанов В. Розв'язання задач термопружності шаруватих конструкцій тривимірній постановці // Машинознавство. – 2007. – №1. – С. 3-7.
9. Киричевский В.В., Козуб Г.А. Матрица теплопроводности конечного элемента для решения задач термоупругости слоистых композитов // Геотехническая механика. – 2006. – Вып. 63. С. 172-177.
10. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «MPELA+» / Под общ. ред. Киричевского В.В. – К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.

УДК 622.232.72.001.57:658.386

Шевченко В.

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЗАТРАТ И ЭКОНОМИЧНОСТИ СИСТЕМЫ «МАШИНИСТ – ВЫЕМОЧНЫЙ КОМБАЙН» В ПРОЦЕССЕ ДОБЫЧИ УГЛЯ

Дано оцінку енерговитрат і економічності системи «машиніст – виймовний комбайн» у процесі видобутку вугілля з пологих і пологонахилених пластів. Установлено залежності зміни показника економічності функціонування від основних технологічних параметрів процесу видобутку.

ESTIMATION OF ENERGY CONSUMPTIONS AND ECONOMY OF A SYSTEM «OPERATOR – CUTTER-LOADER» DURING A COAL MINING

The estimation of energy consumptions and economy of a system «operator – cutter-loader» during coal mining from flat seams is executed. The relations of change of economy parameter of a system «operator – cutter-loader» from the basic technological parameters of process of a mining are established.

Основной структурной единицей современной технологии комплексно механизированной подземной угледобычи, параметры которой существенно определяют как производительность механизированных комплексов нового технического уровня (НТУ), так и безопасность и эффективность всего процесса добычи, остается система «машинист – выемочный комбайн». Поскольку человек является неотъемлемой частью технологии комплексно-механизированной угледобычи, а процесс выемки угля происходит при его непосредственном участии, параметры, характеризующие подсистему «человек», могут накладываться ограничения на эффективность работы очистного забоя. Поэтому, исследование и установление закономерностей влияния параметров горнорабочих на эффективность и экономичность функционирования системы «машинист – выемочный комбайн» в процессе добычи угля является актуальной научной задачей.

На рис. 1 приведены зависимости энерговооруженности P и удельных энергозатрат H_u отечественных и зарубежных очистных комбайнов, определенных для выемки угля из пологих и пологонаклонных пластов, от выемочной мощности пласта m , а также удельных энергозатрат от скорости подачи комбайна v_d . Анализ данных свидетельствуют, что с увеличением выемочной мощности пластов энерговооруженность современных очистных комбайнов