

УДК 622. 647. 2

д.т.н. Корнеев С. В.,  
Долгих В. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

## КОЭФФИЦИЕНТЫ МОДЕЛИ МУНИ-РИВЛИНА В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ANSYS, ПОЛУЧЕННЫЕ ДЛЯ ОБКЛАДОЧНОЙ РЕЗИНЫ ШАХТНЫХ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

*В статье определены значения коэффициентов модели Муни-Ривлина в пакете программ ANSYS 14.0 обкладочной резины шахтной конвейерной ленты. Результаты конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния резины сравниваются с экспериментальными данными.*

*Ключевые слова:* конвейерная лента, обкладочная резина, деформация, модель Муни-Ривлина.

### **Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.**

Масштабная модернизация шахтных ленточных конвейеров на угольных предприятиях Донбасса неразрывно связана с совершенствованием методов их расчета.

Типовой метод тягового расчета ленточных конвейеров, основывающийся на экспериментально полученных интегральных коэффициентах сопротивления движению тягового органа, в настоящее время себя, практически, исчерпал, так как указанные коэффициенты сопротивления, по сути, обеспечивают достаточную точность расчета только для тех условий, в которых они получены. Более того, интегральные коэффициенты не позволяют выявить влияние многих факторов на показатели эффективности конвейера, например, на потребление энергии. В связи развитием компьютерной техники и появлением мощных пакетов программ, позволяющих моделировать сложные механические процессы в системе «лента — груз — ролик-опоры», появляются предпосылки для развития дифференциальных методов расчета (ДМР) [1], учитывающих широкую гамму конструктивных и эксплуатационных параметров конвейера, а также физико-механических свойств элементов системы. Численные ДМР, в основу которых положен метод конечных элементов, позволяют в деталях воспроизводить процесс си-

лового взаимодействия ленты с роликом, определяющий возникновение сил сопротивления движению.

Наиболее широко ДМР, применяются для расчета трубчатых конвейеров [2]. В целом ориентацию на ДМР следует признать перспективной, а ее принципы распространить на серийные шахтные конвейеры. Современным инструментом компьютерного исследования поведения системы «лента — груз — ролик-опоры» является пакет программ ANSYS, позволяющий моделировать как отдельные компоненты системы по методу конечных элементов, так и, что важно, образованную из этих компонентов систему в целом, с учетом их контактов и взаимодействий. Таким образом, применение ANSYS обеспечивает системный подход к исследованию системы. Свойства моделей, имитирующих реальные элементы системы, формируются расчетным путем на основе известных опытных данных, иначе, путем «подгонки» моделей обкладочной резины, сердечника ленты, груза и пр. под эксперимент.

Известна работа С. В. Пешкова [3], в которой приведены значения коэффициентов входящей в ANSYS двухпараметрической модели Муни-Ривлина, предлагаемой для исследования гиперупругих материалов, в данном случае — обкладочной резины шахтных конвейерных лент 2М-1200-4-ТК200-2-5-2 класса А. Автор провел экспериментальные исследования

напряженно-деформированного состояния резины при ее одноосном сжатии и получил зависимости деформаций от нагрузки. Затем, путем компьютерного моделирования, подобрал коэффициенты модели, соответствующие этим экспериментальным зависимостям. Адекватность модели проверялась для более сложных видов деформаций.

Подобным образом решаются задачи для резино-кордовых композиций [4].

Пакет программ ANSYS и его составляющие постоянно развиваются. Естественно, что значения коэффициентов модели Муни-Ривлина, полученные для ANSYS 11.0, оказались непригодными для современной версии ANSYS 14.0, в которой модель Муни-Ривлина, представляется более совершенным алгоритмом. Возникает необходимость в получении коэффициентов модели для версии ANSYS 14.0, например, по методике, предлагаемой в работе [3].

**Постановка задачи.** Задачей настоящей работы является определение в результате компьютерных исследований материальных констант двухпараметрической модели Муни-Ривлина, входящей в состав версии ANSYS 14.0, адекватной экспериментальным зависимостям деформации обкладочной резины конвейерных лент и пригодной для дальнейшего проведения комплексных исследований процесса взаимодействия ленты с грузом и роликоопорами.

**Изложение материала и его результаты.** Следует напомнить, что основной характеристикой модели Муни-Ривлина является удельная энергия деформирования  $W$  [5]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2, \quad (1)$$

где  $I_i$  —  $i$ -е инварианты девиатора деформации;  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  — коэффициенты модели, материальные константы;  $J$  — детерминант матрицы градиента деформации;

$d$  — коэффициент несжимаемости материала;

$$d = \frac{1 - 2\nu}{C_{10} + C_{01}}, \quad (2)$$

где  $\nu$  — коэффициент Пуассона (для резины  $\nu = 0,49$ ).

Величина  $W$  удовлетворяет требованию симметрии относительно главных деформаций  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , что объясняется изотропностью недеформированного материала.

Инварианты тензора деформаций представляются в виде:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 &= \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2, \\ I_3 &= \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Материал резины считается несжимаемым, при этом выполняется равенство  $I_3 = 1$ .

Напряжения Коши в резине:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\frac{\partial W}{\partial I_1}C_{ij} - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}C_{ij}^{-1}, \quad (4)$$

где  $p$  — давление;  $C_{ij}$  — главные инварианты;  $\delta_{ij}$  — дельта-функция Кронекера.

Для определения значений коэффициентов  $C_{10}$  и  $C_{01}$  в выражении (1) использовались экспериментальные диаграммы деформирования обкладочной резины конвейерной ленты 2М-1200-4-ТК-200-2-5-2, класса А (условная прочность при растяжении не менее 24,5МПа), приведенные в работе [3].

Исследования проведены на лабораторной установке БУ-39. В испытуемый образец резины размером 10×10×5 мм вдавливалась металлическая пластинка размером 82×64×14 мм. При этом фиксировались глубина вдавливания пластинки (деформация резины) и сжимающая нагрузка.

График экспериментальной зависимости деформации образца обкладочной резины от сжимающей нагрузки представлен на рисунке 1.

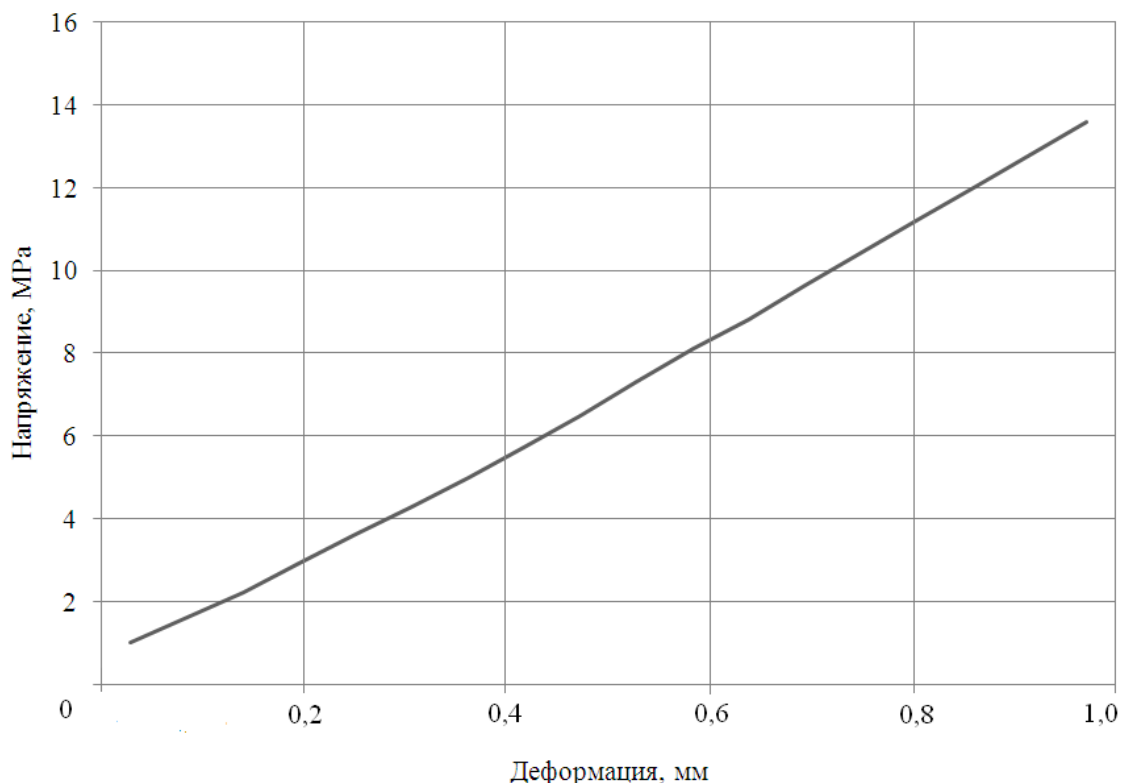


Рисунок 1 — График зависимости «нагрузка-деформация» для обкладочной резины конвейерной ленты [3]

Расчет коэффициентов Муни-Ривлина осуществляется путем аппроксимации экспериментальных данных посредством ANSYS Workbench. Коэффициенты  $C_{10}$  и  $C_{01}$  двухпараметрической модели Муни-Ривлина приняли, соответственно, значения 659110 и  $-323930$  Па. При этом уравнение (1) для обкладочной резины представляется следующим образом:

$$W = 659110(I_1 - 3) - 323930(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2$$

Для оценки адекватности полученной модели обкладочной резины и ее пригодности для дальнейших теоретических расчетов, также решена обратная задача: проведено моделирование процесса сжатия образца. Для этого в программном комплексе ANSYS Workbench инициирова-

лось создание компьютерной модели обкладочной резины: плотностью  $1150 \text{ кг/м}^3$ , коэффициентом Пуассона 0,49 и константами Муни-Ривлина  $C_{10} = 659110$  Па,  $C_{01} = -323930$  Па. К поверхности пластинки прикладывалось давление равное 13,6 МПа. Модель и результаты компьютерного эксперимента представлены на рисунках 2–4.

На рисунке 3 отражено поле распределения напряжений в резине при сжатии. Как видно, максимальные напряжения достигают величины порядка 1,04 МПа. На рисунке 4 показаны соответствующие изополя деформаций. Максимальное значение перемещения в модели составляет 0,92 мм.

Относительная погрешность моделирования, определяемая путем сопоставления расчетных максимальных значений деформации при сжатии с аналогичными опытными значениями, составила 2,42 %.

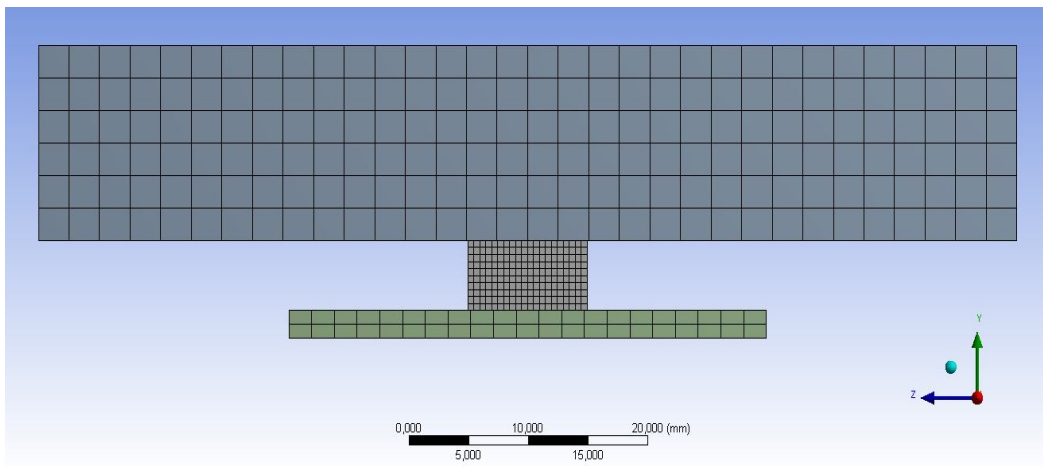


Рисунок 2 — Конечно-элементная модель обкладочной резины конвейерной ленты

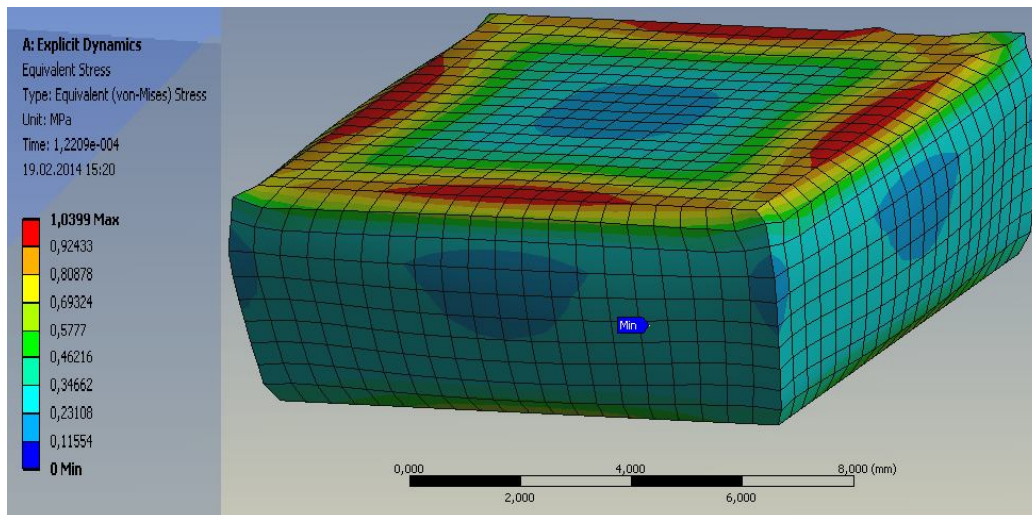


Рисунок 3 — Поле нормальных напряжений  $\sigma_y$

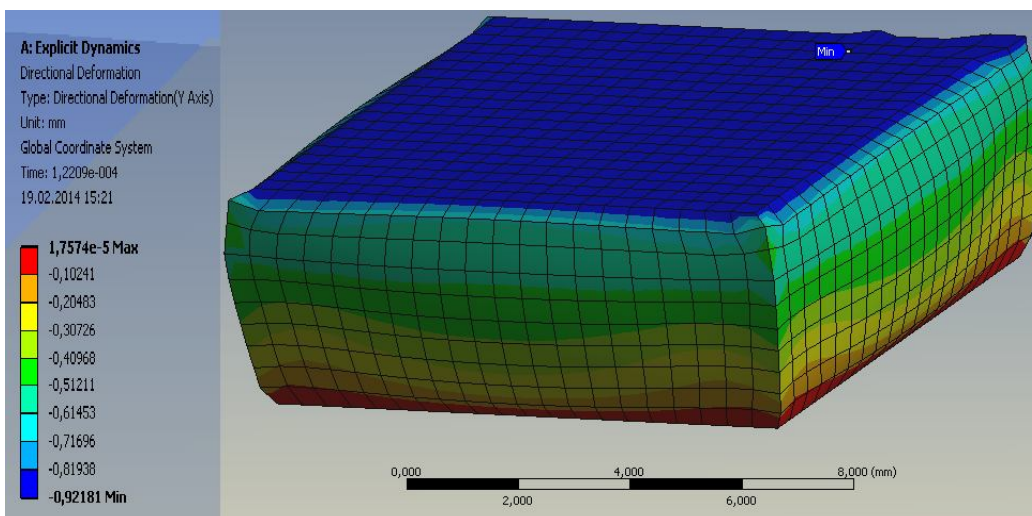


Рисунок 4 — Поле деформаций  $\epsilon_y$

**Выводы и направление дальнейших исследований.**

Таким образом, результаты моделирования обкладочной резины конвейерной ленты, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает адекватность модели Муни-Ривлина из пакета программ ANSYS 14.0.

Модель Муни-Ривлина с полученными материальными константами  $C_{10}$  и  $C_{01}$  предназначается для дальнейших исследований напряженно-деформированного состояния конвейерной ленты с грузом, движущейся по роликоопорам.

**Библиографический список**

1. Галкин В. И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко и др. — М.: МГТУ, 2005. — 543 с.
2. Дмитриев В.Г. Методика тягового расчета ленточного трубчатого конвейера / В. Г. Дмитриев, Н. В. Сергеева // ГИАБ. — М.: МГТУ, 2011. — № 7. — С. 218–228.
3. Пешков С. В. Обоснование параметров магнитных элементов, встроенных в ленту конвейера : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. : 05.05.06 / С. В. Пешков. — Кемерово: КузГТУ, 2009. — 18 с.
4. Левенков Я. Ю. Сглаживающая способность пневматической шины при статическом и динамическом взаимодействии автомобильного колеса с твердой неровной опорной поверхностью : автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. : 05.05.03 / Я. Ю. Левенков. — М.: МГИУ, 2013 — 18 с.
5. Рубцов Б. Г. Теоретическое руководство ANSYS 5.3 / Б. Г. Рубцов, И. Р. Идрисова. — Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. — 117 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Клишиным Н. К., к.т.н., проф. СУНИГОТ УИПА Алексеенко С. Ф.**

Статья поступила в редакцию 11.03.14.

д.т.н. Корнєєв С. В., Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

**КОЕФІЦІЕНТИ МОДЕЛІ МУНІ-РІВЛІНА В ПАКЕТІ ПРОГРАМ ANSYS, ОТРИМАНІ ДЛІА ГУМОВОЇ ОБКЛАДКИ ШАХТНИХ КОНВЕЄРНИХ СТРИЧОК**

У статті визначені значення коефіцієнтів моделі Муни-Рівліна в пакеті програм ANSYS 14.0 гумової обкладки шахтної конвеєрної стрічки. Результати скінченно-елементного аналізу напружено-деформованого стану порівнюються з експериментальними даними.

**Ключові слова:** конвеєрна стрічка, гумова обкладка, деформація, модель Муни-Рівліна.

Korneev S. V. Doctor of Engineering Sciences, Dolgih V. P. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine).

**MOONEY RIVLIN COEFFICIENTS IN THE ANSYS PROGRAMME PACKAGE, OBTAINED FOR TUCK RUBBER MINE CONVEYER BELTS**

Mooney rivlin coefficients in the ansys 14.0 programme package obtained for tuck rubber mine conveyer belts are defined in the article. The results of finite element analysis of rubber stress-strain state are compared with experimental data.

**Key words.** Conveyer belt, tuck rubber, deformation, Mooney Rivlin model.