

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ «ГРУЗ – КОНВЕЙЕРНАЯ ЛЕНТА – РОЛИКООПОРЫ» В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ ANSYS WORKBENCH

В.П. Долгих, Донбасский государственный технический университет, Украина

Приводятся результаты моделирования компьютерной модели системы «груз – лента – роlikоопоры» в программном комплексе ANSYS, которые позволяют определить силу сопротивления движению конвейерной ленты на роlikоопоре в зависимости от натяжения ленты и скорости движения тягового органа.

Введение. В настоящее время в соответствии с основными положениями Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года объем добычи угля планируется увеличить до 130 млн. т. в год. Это неизбежно приведет к возрастанию нагрузки на все участки горного производства, а также к необходимости разработки мероприятий по энергосбережению.

На подземный магистральный и участковый конвейерный транспорт приходится около 15,4 % общего по шахте расхода электроэнергии [1]. При этом важным фактором энергосбережения остается снижение сопротивлений движению ленты с грузом по конвейерному ставу.

Состояние вопроса, выделение нерешенной части проблемы. В результате многочисленных, в основном экспериментальных работ, исследований выявлены основные причины возникновения сопротивлений движению тягового органа (ТО): вдавливание роликов в обкладочную резину ленты, изгибные деформации ленты и груза при ее прохождении по конвейерному ставу и трение в подшипниках роликов. Это подготовило почву для разработки дифференциальных методов тягового расчета, основной идеей которых является расчет локальных сопротивлений движению на каждой роlikоопоре, являющихся суммой отдельных сопротивлений, соответствующих каждому из приведенных выше источников. Такой подход предопределил следующий этап исследований каждого вида сопротивлений в отдельности и появление множества публикаций на эту тему. Например, в работе [2] на основе наследственной теории упругости рассматривается сопротивление от изгиба ленты с грузом при прохождении роlikоопор. При этом лента представляется в виде изгибающейся в вертикальной плоскости цилиндрической пластины, касающейся роликов в одной точке.

В работе [3] при определении сопротивления, возникающего при вдавливании роликов в ленту, которая представляется в виде пластины с поверхностным слоем резины, используется модель стандартного линейного тела.

Теоретические исследования позволили выявить, по крайней мере, на качественном уровне, факторы, оказывающие наиболее существенное влияние на исследуемые сопротивления движению ленты с грузом. Полученные при этом сложные и громоздкие аналитические зависимости показателей напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов системы «груз – лента – роlikоопоры» (ГЛР) оказались малоприменимыми для практических целей.

В каждом случае исследовались некоторые предельные состояния НДС. Чрезмерная идеализация системы исключает возможность рассмотрения всего спектра НДС, возникающих в результате одновременного воздействия всех факторов.

Новые возможности исследования сложных НДС системы появились в связи с развитием компьютерных технологий, в частности, пакета программ ANSYS, основывающихся на методе конечных элементов (МКЭ) [4]. Однако весь потенциал компьютерных методов, которые позволили бы исследовать закономерности формирования нагрузок в системе ГЛР, не получил достаточной реализации.

Известны аналитические исследования с применением ANSYS ленточных трубчатых конвейеров [5]. Хотя разработанные для них модели и результаты моделирования, в силу специфики конвейеров и принятых допущений относительно ленты и груза, не могут быть в полной мере распространены на серийные шахтные ленточные конвейеры, тем не менее, полученный опыт демонстрирует широкие возможности ANSYS применительно к анализу сложных систем.

Очевидно, применение ANSYS позволит снять ряд ограничений и допущений, максимально приблизить модель системы ГЛР к реальному объекту, исследовать сложные НДС, не выделяя отдельные виды деформаций, и на этой основе разработать дифференциальную методику тягового расчета конвейера.

Цель статьи – разработка компьютерной модели системы «груз – лента – роликоопоры» в программном комплексе ANSYS, позволяющей исследовать закономерности формирования нагрузок в системе и сопротивлений движению ленты на трехроликовой опоре.

Постановка задачи. Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи: разработать компьютерную модель системы «груз – лента – роликоопоры» в программном комплексе ANSYS; проверка адекватности модели реальной конвейерной установке; исследование влияния натяжения и скорости движения тягового органа на сопротивление движению.

Изложение основного материала. Моделирование системы ГЛР, расчетная схема которой представлена на рис. 1, проводится поэтапно согласно структурной схеме, приведенной на рис. 2.

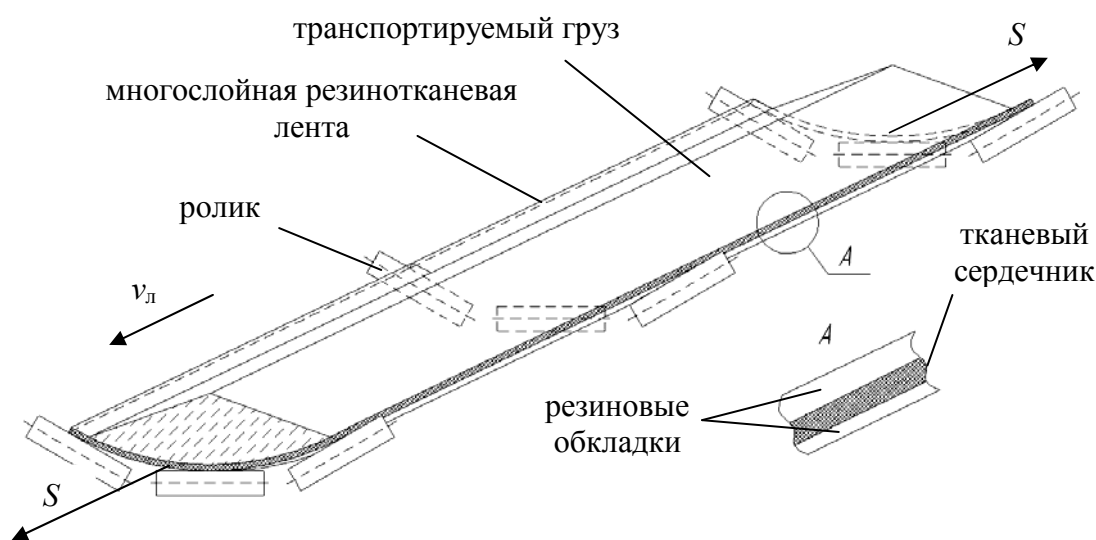


Рис. 1. Расчетная схема системы ГЛР

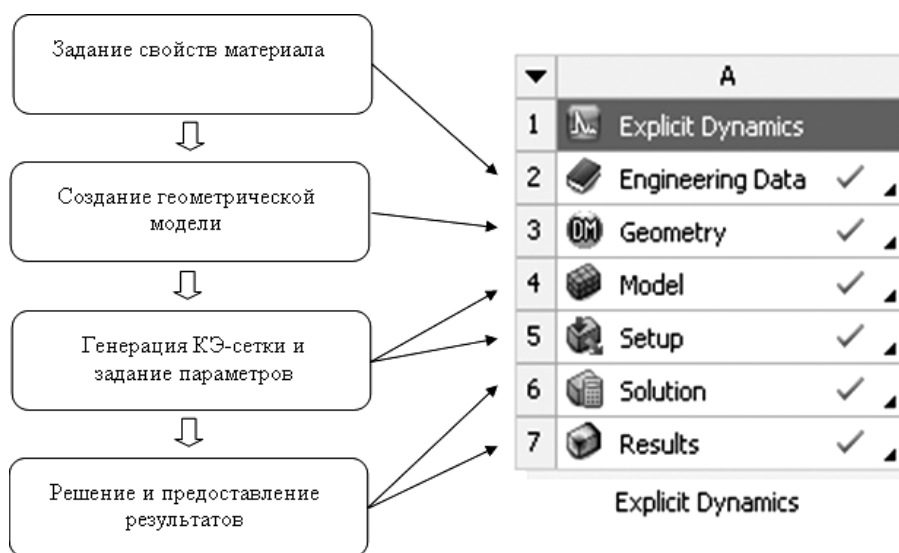


Рис. 2. Структурная схема моделирования в ANSYS Workbench

Вначале в блоке Engineering Data, исходя из физических представлений о природе структурных элементов системы ГЛР, из набора типовых моделей, описывающих те или иные материалы, выбираются наиболее подходящие, с параметрами, отражающими определенные

физико-механические свойства реальных объектов. Для насыпного гранулированного груза (угля, породы) принимается модель Drucker-Prager, рекомендуемая для упруго-идеально-пластических материалов. Модель Drucker-Prager основывается на одноименном критерии текучести, согласно которому поверхность текучести представляет собой круговой конус с параметрами материала, подобранными таким образом, что эта поверхность является описанной вокруг шестигранника Мора-Кулона. Резиновые обкладки ленты представляются двухпараметрической моделью Mooney-Rivlin, которая обычно применяется для исследования гиперупругих материалов. Изотропный материал считается гиперупругим, если характеризуется функцией плотности энергии деформирования, которая является скалярной функцией тензора деформации или тензора перемещения. Производные функции по компонентам деформации определяют соответствующие компоненты напряжений. Модель идентифицируется так называемыми материальными коэффициентами C_{10} и C_{01} , определяемыми расчетным путем на основании экспериментальных зависимостей «нагрузка – деформация». Сердечник ленты представляется в виде ортотропной оболочки. Ролики рассматриваются как твердое упругое тело.

Этап построения трехмерной геометрической модели системы реализуется в модуле Design Modeler блок Geometry.

Далее, для реализации численного решения поставленных задач, на геометрическую модель наносится конечно-элементная сетка. Данная процедура осуществляется в модуле Mechanical блок Model. После получения сетки конечных элементов задаются параметры процесса движения ленты с грузом и внешние воздействия на систему. Контактная задача взаимодействия элементов в системе ГЛР решается с помощью метода штрафных функций.

На последнем этапе построения системы ГЛР задаются конструктивные, силовые и режимные параметры реального конвейера. Наконец, процесс моделирования завершается проведением спланированных компьютерных экспериментов с последующей обработкой и интерпретацией результатов.

Компьютерная модель (см. рис. 1) состоит из трех трехроликовых опор, насыпного груза – угля и резинотканевой ленты 1000 EP-800/4-5+2. Скорость движения тягового органа v_d варьировалась от 2 до 2,5 м/с. Диаметр роликов – 0,108 м, ширина ленты – 1 м; расстояние между ролюкоопорами – 1,2 м. Вес груза на участке ленты – 3100 Н. Натяжение ленты – 7,5; 15; 22,5; 30; 37,5 кН.

Параметрам модели груза присваиваются следующие значения: плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $E = 3,2 \cdot 10^7 \text{ Па}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,21$, модуль сдвига $G = 1,32 \cdot 10^7 \text{ Па}$, объемный модуль $K = 1,83 \cdot 10^7 \text{ Па}$. При моделировании сердечника ленты принимаются: $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости по оси x $E_x = 8 \cdot 10^8 \text{ Па}$, модули упругости по осям y и z $E_y = E_z = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$, $\nu = 0,4$, модуль сдвига по оси x $G_x = 2,85 \cdot 10^8 \text{ Па}$, модули сдвига по осям y и z $G_y = G_z = 1,14 \cdot 10^8 \text{ Па}$. Как установлено в работе [6], для модели резины типа 2М-1200-4-ТК-200-2-5-2 в ANSYS версии 14.0 $C_{10} = 0,66$ и $C_{01} = -0,32 \text{ МПа}$.

На рисунке 3 отражена конечно-элементная сетка модели и ее граничные условия.

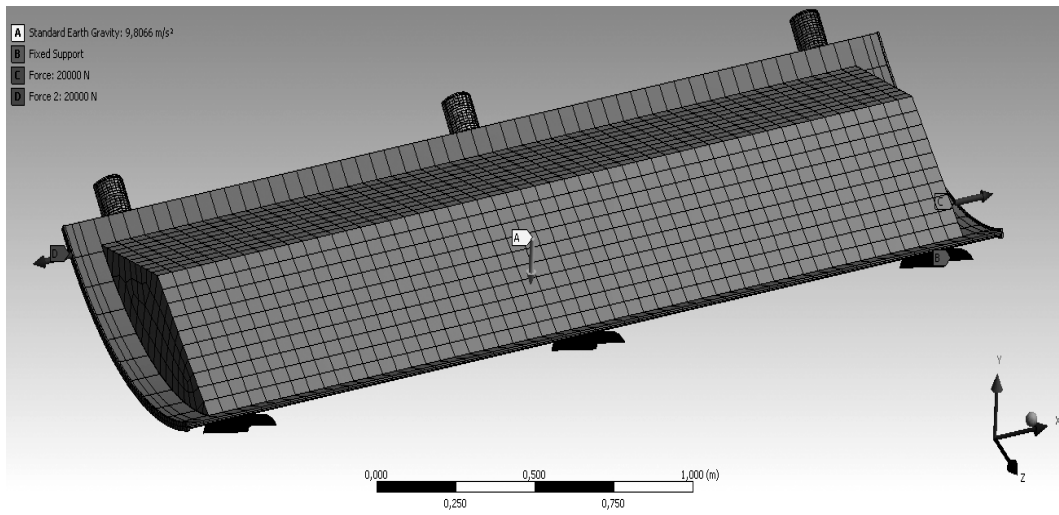


Рис. 3. Конечно-элементная сетка модели системы ГЛР

Результаты исследования НДС системы ГЛР представлены на рисунках 4 – 7.

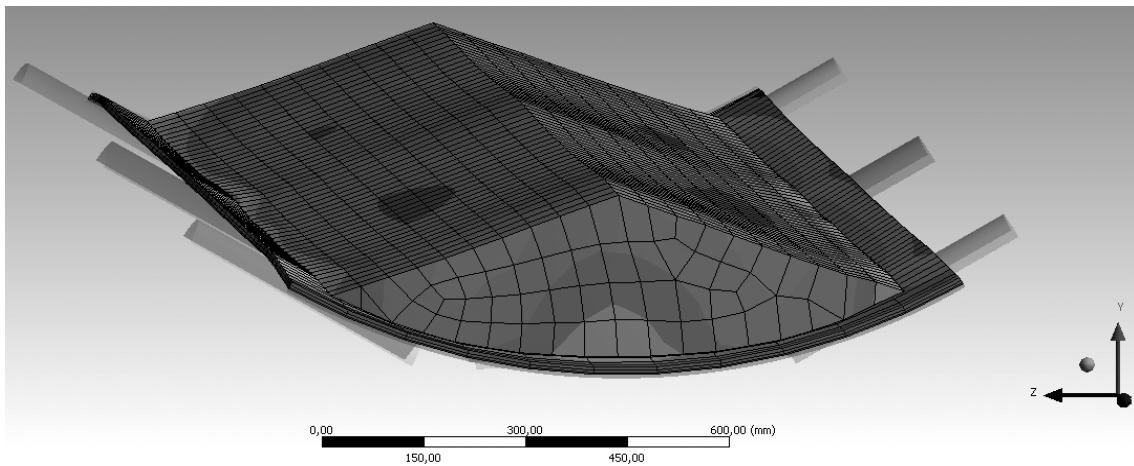


Рис. 4. Картина распределения деформаций элементов модели системы ГЛР

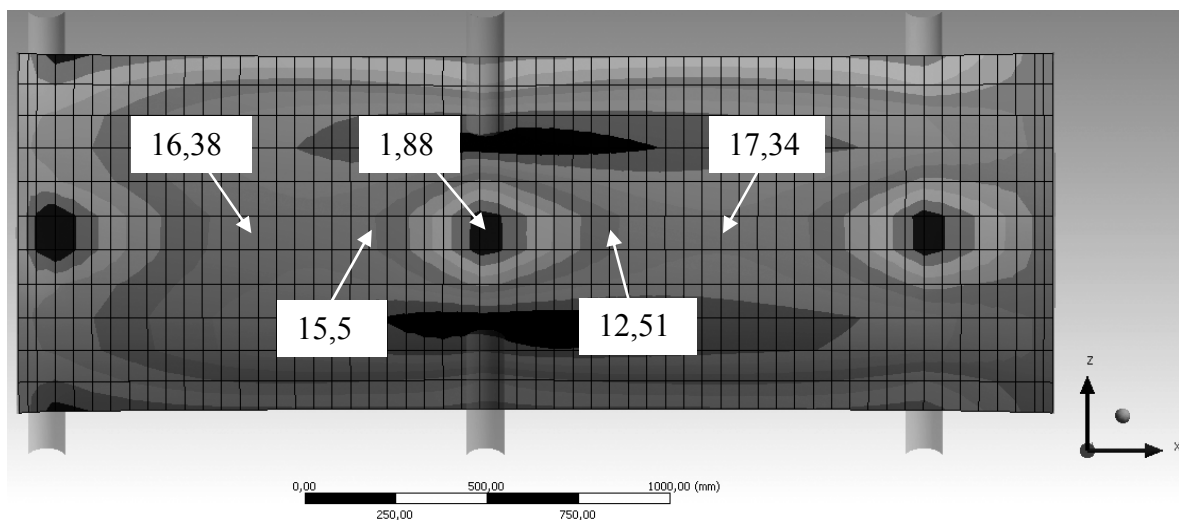


Рис. 5. Картина распределения провесов ленты на роликах и между ними (вид снизу)

На рис. 5 отражено поле распределения провесов ленты, как на роликах, так и в пролете между роликоопорами. При этом максимальный провес при скорости движения тягового органа 2 м/с и натяжении 37,5 кН составляет 17 мм, а минимальная деформация ленты, которая наблюдается на среднем ролике, составляет 1,88 мм, что отражает реальную картину провисания при заданном натяжении. Если в теоретической работе [3] проекция области контакта ленты со средним роликом на горизонтальную плоскость представляется в виде эллипса, то проекция этой же области, полученная в результате моделирования, имеет более сложную форму. Между тем, в обоих случаях наблюдается смещение области контакта и зоны повышенных напряжений относительно ролика против хода ленты, что объясняется реологическими свойствами резины. Заметим, что согласно современным представлениям о контакте движущейся ленты с роликом, именно в результате такого смещения центра приложения сил образуется крутящий момент, препятствующий вращению роликов и поясняющий возникновение сопротивления движению ленты от вдавливания.

Полученные распределения деформаций, перемещений и напряжений также находятся в полном соответствии с положениями теории [7], согласно которой от середины пролета и до роликоопоры по ходу ленты имеет место зона пассивного давления груза, а сразу же за роликоопорой – зона активного давления груза. В пролетах между роликоопорами наблюдается развал ленты и груза.

Для достижения желаемой точности резко возрастают затраты машинного времени. Вместе с тем известно, что нагрузку на подшипники можно определять по максимально нагруженному среднему ролику желобчатой роликоопоры при постоянном грузопотоке, с учетом того, что большая часть действующей нагрузки приходится на средний ролик (65 - 70%) [8]. На первом этапе ограничились исследованием сопротивления движению на среднем ролике.

При исследовании зависимостей силы сопротивления движению ленты на среднем ролике от натяжения и скорости ленты ось среднего ролика условно принимается абсолютно твердой, а вращающаяся часть ролика – деформируемой. При прохождении груженой ленты на его внутренней поверхности, которая контактирует по всей длине с осью, возникают нормальные напряжения σ_x (рис. 6).

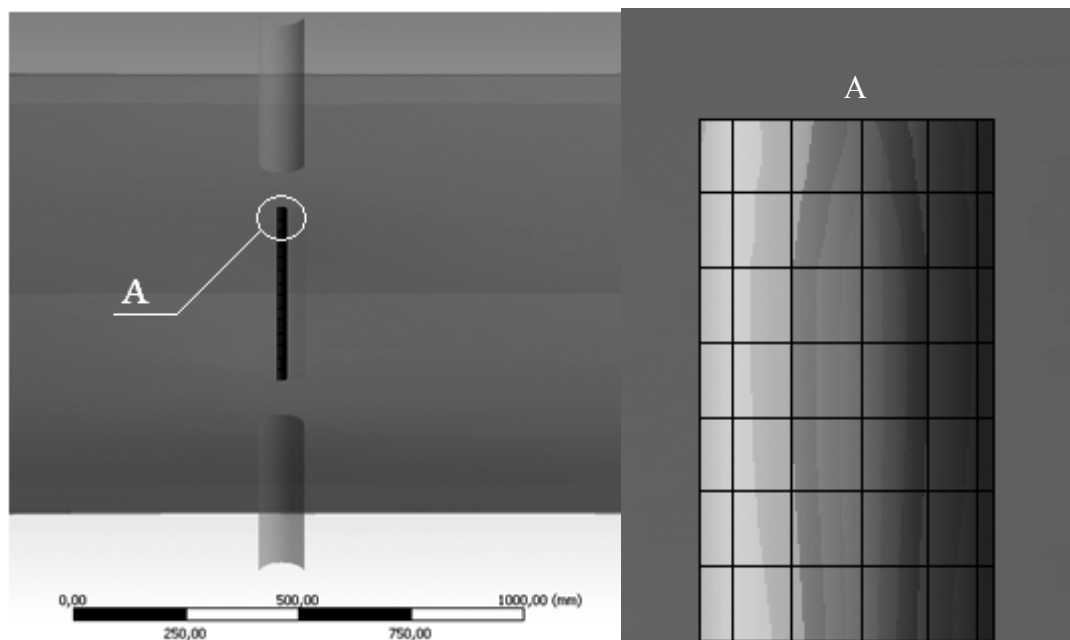


Рис. 6. Картина распределения нормальных напряжений σ_x в зоне контакта оси с вращающейся частью среднего ролика

Величина общей силы сопротивления движению W_i на каждой площадке, образуемой i -м элементом ролика, определялась как произведение σ_{xi} на соответствующий угол оси ролика α_i , где i – номера узлов по поверхности касания оси и вращающейся части ролика (рис. 7).

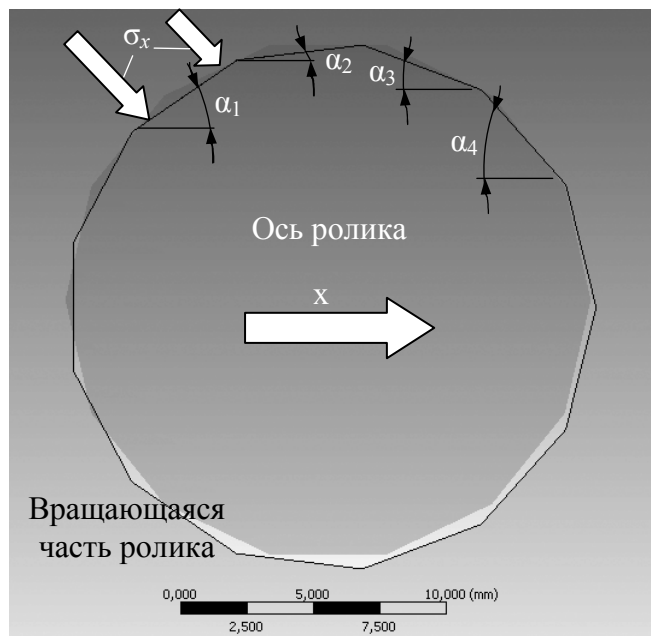


Рис. 7. Распределение нормальных напряжений σ_x по оси и вращающейся части

параметров: угол наклона боковых роликов – 30° , ширина ленты ТК-200 – 1 м, расстояние между роликосторами – 1,12 м, погонный вес груза – 1600 Н/м, диаметр роликов – 0,108 м. Сопоставление полученных результатов подтверждает общую адекватность компьютерной модели традиционным тенденциям тягового расчета ленточного конвейера.

Коэффициент общего сопротивления движению для грузовой ветви конвейера определяется по формуле:

$$w' = \frac{W}{(q_{\Gamma} + q_{\text{л}} + q'_{\text{р}})gl'_{\text{р}}} \quad (1)$$

где q_{Γ} – погонная масса транспортируемого груза;

$q_{\text{л}}$ – погонная масса ленты;

$q'_{\text{р}}$ – погонная масса вращающихся частей роликостора верхней ветви;

g – ускорение свободного падения;

$l'_{\text{р}}$ – расстояние между роликосторами на верхней ветви конвейера.

Графические расчетные зависимости w' от исследуемых факторов, полученные при его 100% загрузке грузом, представлены на рисунке 8. Там же приведены аналогичные зависимости $w'(S, v_{\text{л}})$, полученные в результате физического эксперимента, проведенного В.И. Харченко [9], для следующих параметров:

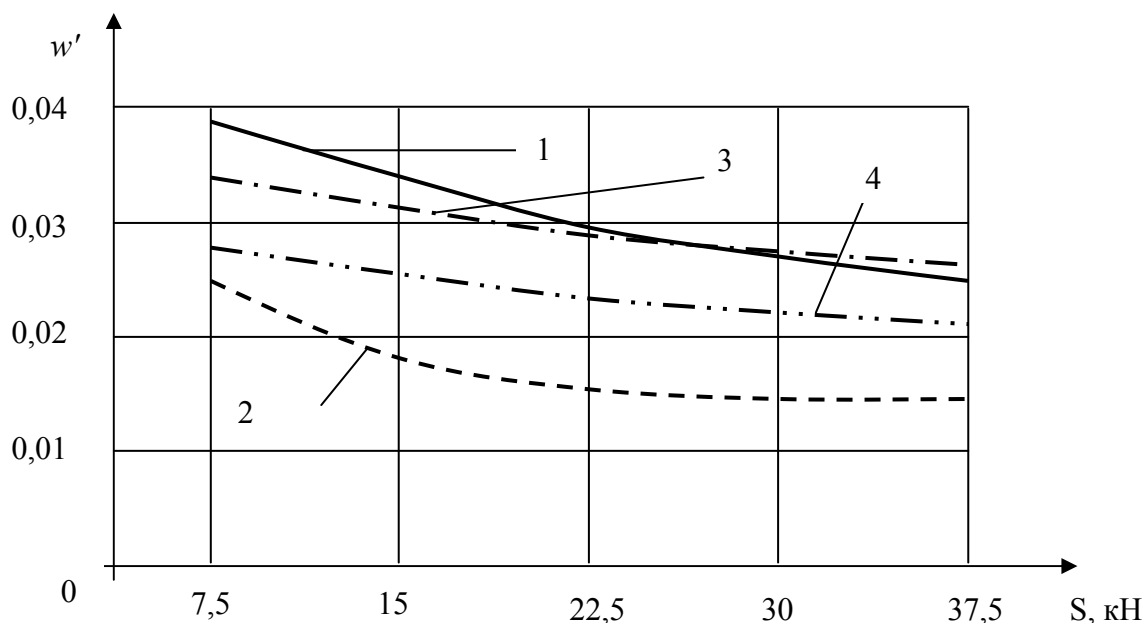


Рис. 8. Графики зависимостей коэффициента w' на трехроликовой опоре от натяжения тягового органа: 1, 2 – результаты компьютерного моделирования при $v_{\text{л}} = 2,5; 2$ м/с; 3, 4 – результаты В.И. Харченко при $v_{\text{л}} = 3,15; 1$ м/с.

На рис. 8. показана зависимость общего коэффициента сопротивления движению от натяжения и скорости движения тягового органа шахтного ленточного конвейера. При анализе кривых следует, что повышение скорости движения приводит к нелинейному возрастанию сопротивления на 50% (с 0,026 до 0,039), которое в большей степени определяется потерями при изменении формы ленты и груза. С ростом S величина w' нелинейно убывает на 33 – 35% (с 0,039 до 0,026), поэтому для снижения энергоемкости транспортирования целесообразно несколько «перетягивать» ленту, при сохранении тяговой способности привода. Расчетные значения w' , полученные для исследуемого диапазона изменения факторов конвейерной установки, находятся в пределах 0,013...0,03. Также необходимо отметить тот факт, что установленные в результате компьютерного эксперимента зависимости достаточно хорошо согласуются с результатами физического эксперимента В.И. Харченко.

Выводы и направление дальнейших исследований. Итак, разработана компьютерная модель системы «груз – лента – роликоопоры» в программном комплексе ANSYS. Модель позволяет исследовать систему комплексно при всем многообразии ее свойств и внешних воздействий, воссоздавая сложную картину напряженно-деформированного состояния ее элементов. Подтверждено соответствие результатов моделирования известным фактам и положениям теорий, описывающих отдельные, частные виды деформаций (вдавливание роликов в обкладочную резину ленты, изгиб ленты между роликоопорами и т.д.).

Разработанная модель системы «груз – лента – роликоопоры» позволяет исследовать зависимости общего сопротивления движению ленточного конвейера на среднем ролике от натяжения ленты и скорости движения тягового органа и создает предпосылки для всестороннего исследования напряженно-деформированного состояния ее элементов, создания дифференциальной методики тягового расчета и оптимизации конструктивных и режимных параметров, минимизирующих затраты энергии.

Список литературы

1. Пивняк Г.Г. Энергоэффективные технологии на угольных шахтах и в энергетике / Г.Г. Пивняк, В.Т. Зайка, Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов // Электрика. – 2010. – № 10. – С. 3 – 8.
2. Кирия Р.В. Определение коэффициента сопротивления движению ленты по роликоопорам конвейера, обусловленного изгибом ленты / Р.В. Кирия, В.Ю. Максютенко, Т.Ф. Мищенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 106. – С. 140–146.
3. Lodewijks G. Energy Consumption of Pipe Belt Conveyors: Indentation Rolling Resistance / G. Lodewijks, M. Zamiralova // FME Transactions. – 2012. Vol. 40. – P. 171 – 176.
4. Бруяка В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. пособ. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
5. Дмитриев В.Г. Методика тягового расчета ленточного трубчатого конвейера / В.Г. Дмитриев, Н.В. Сергеева // ГИАБ. – М.: МГТУ, 2011. – № 7. – С. 218 – 228.
6. Корнеев С.В. Коэффициенты модели Муни-Ривлина в пакете программ ANSYS, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент / С.В. Корнеев, В.П. Долгих // Сб. научн. трудов ДонГТУ. ИПЦ «Ладос». – 2014. – Вып. 42. – С. 45 – 49.
7. Галкин В.И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко и др. – М.: Изд-во МГТУ, 2005. – 543 с.
8. Шоджааталхосейни С. Определение нагрузок на подшипники роликоопор линейных секций ленточных конвейеров горных предприятий / С. Шоджааталхосейни // ГИАБ. – М.: МГТУ, 2009. – № 1. – С. 83 – 89.
9. Харченко В.И. Рационализация геометрических параметров линейных роликоопор ленточных конвейеров общего назначения на стадии конструирования: Дис. канд. техн. наук: спец. 05.05.06 «Горные машины» / В.И. Харченко. – М., 1994. – 248 с.