

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛ ПРИ РАБОТЕ СТАЛЬНЫХ КАНАТНОГО БЛОКА И КАНАТА

*Дмитрий Марченко*

*Николаевский национальный аграрный университет  
54020, г. Николаев, ул. Парижской коммуны, 9*

***Dmitry Marchenko***

*Nikolaev National Agrarian University  
54020, Nikolaev, st. Paris Commune, 9*

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследований напряженно-деформированного состояния при работе стальных канатного блока и каната. С помощью конечно-элементного моделирования выполнено численное решение пространственной и плоско-напряженной контактной задачи при использовании прикладных программных комплексов APM WIN Machine и Structure CAD. Результаты анализа статического и динамического нагружения пары показали, что максимальный уровень контактных напряжений (поля напряжений), а следовательно и самая большая интенсивность трибоконтактного изнашивания, приходится на рабочий профиль канатного блока, а именно на тороидальную и конические поверхности за счет смятия канатом рабочей поверхности.

**Ключевые слова:** контактная задача, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементное моделирование, трибоконтактный износ, канатный блок, канат.

### ВВЕДЕНИЕ

Микронеровности рабочих поверхностей вызывают очень значительные изменения контактных напряжений в крайнем поверхностном слое. Напряжения, которые появляются на неровностях поверхности, могут значительно превышать напряжения сдвига, которые возникают на критической глубине под поверхностью контакта. Нагрузки концентрируются на гребешках микронеровностей, ультраместные напряжения легко переходят границу упругости и пластическую деформацию материала и начинается со смятия вершин микровыступов. С повышением нагрузки пластическая деформация захватывает группы гребешков, расположенных на вершинах макронеровностей поверхности, деформируя их и образуя отдельные пятна в зоне общей поверхности контакта.

На отдельных участках пластическая деформация может объединяться с упругой деформацией материала в зависимости от формы неровностей, размеров, объединение в их расположении и, в конце концов, в зависимости от упругих и пластических свойств самого материала и его поверхностного слоя.

Увеличение сжимаемых нагрузок свыше определенной границы, зависимой от свойств материала, нарушает картину распределения упругих деформаций и напряжений, поскольку вызывает безвозвратные деформации в значительных объемах, соизмеримых с общим объемом материала, охваченной местной деформацией. Однако пластическая деформация гребешков микронеровностей и даже всего поверхностного слоя есть обязательным для любого одноразового нагружения реальных поверхностей.

При повторном нагружении поверхности тем же нагружением пластическая деформация крайнего поверхностного слоя возобновляется, но в значительно меньшей мере и быстро затухает, хотя полностью не прекращается ни при повторном статическом сжатии, ни тем более при качении или качении со скольжением [1].

В процессе работы при циклических контактных нагрузках происходит непрерывное изменение свойств крайнего поверхностного слоя и к моменту начала усталостного разрушения в работе принимает участие материал с абсолютно другими свойствами, чем в начальный период [2].

При граничной нагрузке упруго-пластические деформации в контакте, имея в виду, которое при ограниченном числе нагрузок возникающее смятие поверхностей имеет некоторую границу, зависимую от приспособляемости материала, или же смятие прогрессирует, но очень медленно. Такое же поведение материала в зоне контакта

возможно и при большом числе циклов нагружения, но при этом уже приходится учитывать такие явления, как диспергирование поверхности, стирание, усталостное разрушение в разных взаимодействиях в зависимости от условий работы деталей и, конечно же, свойств материалов, которые вступают в контакт.

В одних случаях преобладает усталостное разрушение рабочего слоя, в других – прямой износ, у третьих – их комбинация в разных «пропорциях».

Имея в виду, что в реальных конструкциях имеет место и «чистая» усталость, и прямое стирание, и переформирование поверхностей контакта за счет пластических деформаций, необходимо учитывать трудность оценки комбинированного действия указанных факторов. Поэтому понятное стремление специалистов упростить задачу, абстрагироваться от некоторых моментов, ограничить число параметров при рассмотрении картины разрушений в контакте. Например, при построении метода расчетов стальных подъемных канатов по сроку службы можно опираться на один только параметр, на механический износ проволок, на стирание их при взаимном скольжении в процессе изгиба каната на блоках и барабанах. Но можно принять и другой критерий, также единый, – критерий усталостного разрушения проволок, которые повторно нагружаются в контактах между собой и между проволочками и ручьями блоков (суммирования при этом контактные напряжения с напряжениями от изгиба, кручения, растяжения). На самом деле же, как известно, существенным образом влияют оба фактора износа каната, хотя в разных условиях по-разному (шахтный подъем, полиспастный подъем крана и др.) [3].

Практика эксплуатации проволочных канатов показывает, что неравномерное распределение напряжений по слоям существенным образом снижает долговечность канатов, поскольку перегруженные слои проволок быстро разрушаются, а разгруженные слои проволок отслаиваются. Мера неравномерности распределения напряжений между проволочками каната может быть оценена величиной механического износа проводов каната [4 – 6].

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одной из основных проблем прикладной механики является построение методов, которые позволяют адекватно оценивать напряженно-деформированное состояние (НДС) разных технических объектов [7 – 9]. Поэтому предлагается провести численный анализ для определения НДС при работе канатного блока и каната с помощью метода конечно-элементного моделирования.

Объектами исследования является пара «канатный блок – канат».

Стальной канатный блок изготовлен со стали 35Л (ГОСТ 977 – 88) согласно конструкторской документации на судоперегрузатель «KRUPP». Радиус рабочего профиля канатного блока  $r_0 = 18$  мм; глубина профиля  $h = 50$  мм; диаметр канатного блока по диаметру рабочего профиля = 800 мм; половина угла рабочего профиля ручья канатного блока  $\alpha_0 = 22,5^\circ$ ; модуль упругости канатного блока  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ .

Стальной канат двойного витья с линейным прикосновением проволок в прядях типа ЛК-РО конструкции  $6 \times 36(1+7+7/7+14)+7 \times 7(1+6)$  с металлическим сердечником выполненный по ГОСТ 7669 – 80. Модуль упругости материала проводов  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; коэффициент трения  $\mu = 0,2$ . Угол обхвата канатом рабочего профиля канатного блока  $180^\circ$ . Одна из торцевых поверхностей каната жестко закреплена через канатный блок на балансире с гидравлическими амортизаторами, который служит для натяжения каната с целью уменьшения динамических колебаний и смятения ударов при разных послаблениях или разрыве одного из ремней каната (здесь и дальше под торцевой поверхностью пряди каната имеется в виду совокупность торцевых поверхностей составляющих ее проволок). На противоположном торце, который проходит через систему полиспастов к канатному барабану, моделируется поверхность с поведением, которое точно отвечает реальным условиям нагрузки пряди каната. Исследования распространяются на случаи статического и динамического нагружения торцевой поверхности пряди с жестким поведением. К ней прикладыва-

ются продольная растягивающая сила, момент, который вызывает скручивание пряди.

Для конечно-элементного решения данной контактной задачи при работе стальных канатного блока и каната были использованы прикладные программные комплексы APM WIN Machine и SCAD Office.

Для создания расчетной геометрии исследуемого объекта использовалась одна из распространенных в инженерной практике систем твердотельного трехмерного проектирования. Пространственная модель была выполнена в графическом редакторе AutoCAD и импортированная через STEP формат в препроцессор трехмерного графического редактора APM Studio, что входит в программный комплекс APM WIN Machine, для моделирования с использованием объемных твердотельных (солид) элементов [10, 11]. На рис. 1 показаны результаты моделирования геометрии пары канатного блока и каната.

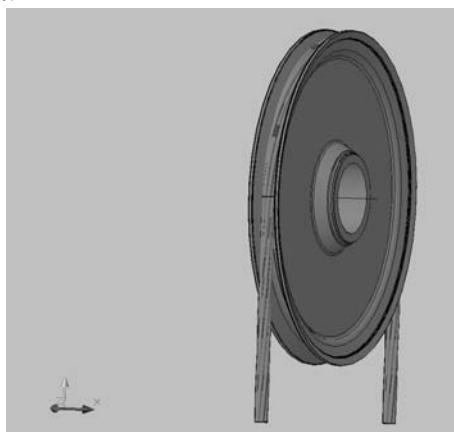


Рис. 1. Пространственная геометрическая модель

Fig. 1. The spatial geometry model

После создания/импорта пространственной геометрической модели были последовательно указанные пары контактирующих деталей и поверхностей, по которым будет происходить взаимодействие. На поверхности совпадающих граней таким образом были созданные контактные и целевые элементы.

Подготовительный этап расчетов включает разбивку пространственной модели «канатный блок – канат» на четырехузловые конечные элементы в виде сетки тетраэдров (рис. 2). Количество элементов конечно-элементной модели – 116695; количество уз-

лов – 34769; количество степеней свободы – 104307.

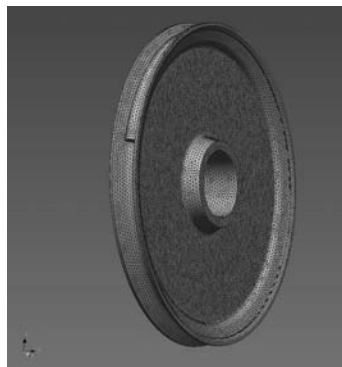


Рис. 2. Конечно-элементная расчетная пространственная модель

Fig. 2. The finite element model of the design space

После разбивки конечно-элементной сетки расчетная модель импортировалась в модуль анализа на прочность APM Structure3D программного комплекса APM WIN Machine, где задавались закрепления узлов и свойства материала, прикладывались нагрузки, которые наблюдаются в условиях эксплуатации пары «канатный блок – канат», вносились свойства контактирующих зон и элементов.

Расчет контактного взаимодействия проводился в рамках нелинейного расчета, в т.ч. и статического расчета, в предположении малых перемещений и упругих деформаций. В процессе расчета создавались фиктивные элементы, которые связывают контактирующие поверхности, и, в зависимости от относительного перемещения узлов этих поверхностей, на каждой итерации уточнялись усилия в площадке контакта и находились решения для системы линейных алгебраических уравнений в матричной форме. Критерием сходимости являлось условие минимального взаимного проникновения объектов.

Результатами расчетов контактного взаимодействия пары «канатный блок – канат» являются перемещения, напряжения и деформации, которые возникают в объемных элементах, взаимное проникновение и состояние контактных элементов в контактной области.

Анализ напряженно-деформированного состояния показывает, что максимальное эквивалентное напряжение возникает не на поверхности рабочего профиля канатного блока, а в районе галтельного перехода под сту-

пицу блока и достигает значения 450 МПа (рис. 3).

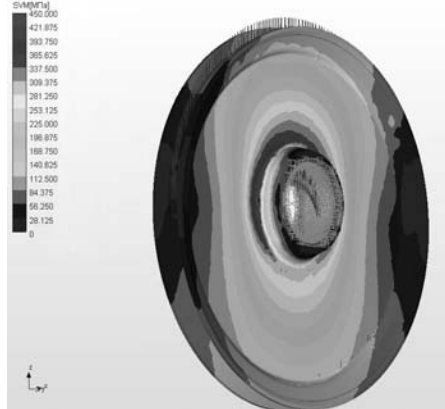


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений за Мезисом

Fig. 3. The distribution of equivalent stress for Mezisom

Следует отметить, что максимальное нормальное напряжение по оси  $Y$  локальной системы координат достигнет своего максимума в 226 МПа на тороидальной и конических частях рабочего профиля канатного блока (рис. 4). Распределение касательных напряжений в площадке с нормалью  $Y$  и в направлении  $Z$  системы координат приведены на рис. 5.

Изополя напряжений, представленные на рис. 4 и рис. 5, отвечают случаю рабочего режима пары «канатный блок – канат», когда полукруг качения каната катится по средней линии рабочего профиля канатного блока. При данном режиме работы прослеживается минимальный уровень интенсивности рабочих напряжений, а также минимальный уровень поперечных нагрузок. Меняя относительное положение каната и канатного блока в небольших значениях, которое происходит через динамические нагрузки, приводит к возникновению существенных продольных нагрузок, а также возникновения увеличенной области контакта. В этом случае контакта возникают зоны с повышенным значением напряжений и существенное относительное проскальзывание, которое приводит к возникновению зон пластичности и быстрого износа рабочего профиля канатного блока. В процессе строгивания достигаются более высокие напряжения, чем при установленном качении, которое необходимо учитывать при расчетах на прочность и оценке срока службы канатных блоков.

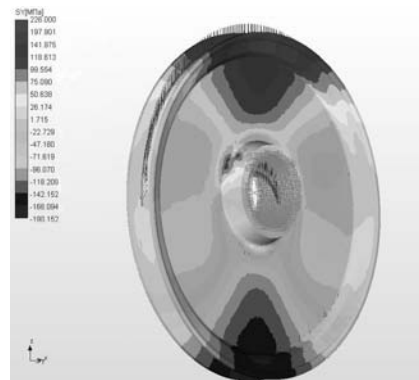


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений пространственной модели

Fig. 4. The distribution of normal stresses spatial model

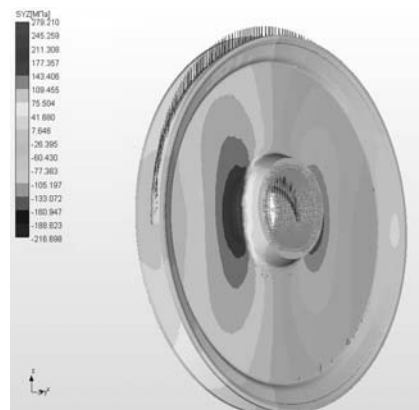


Рис. 5. Распределение касательных напряжений пространственной модели

Fig. 5. The spatial distribution of the shear stress model

Максимальные относительные деформации, как упругие, так и пластические возникают на рабочей поверхности профиля блока во время работы в паре с канатом и в районе галтельного перехода под ступицу канатного блока (рис. 6). Максимальное значение суммарных линейных перемещений будет составлять 0,8041 мм (рис. 7).

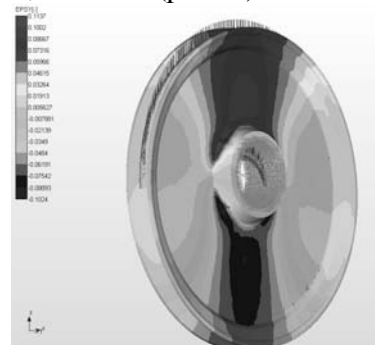


Рис. 6. Распределение линейных относительных деформаций пространственной модели

Fig. 6. The strain distribution of the linear spatial model

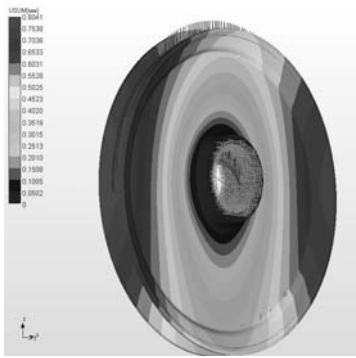


Рис. 7. Распределение суммарных линейных перемещений пространственной модели  
 Fig. 7. Distribution of total linear displacement of the spatial model

Анализ распределения относительных деформаций канатного блока в паре с канатом показывает, что пластические деформации являются существенным фактором, который необходимо учитывать при оценке процессов накопления трибоповреждений на рабочем профиле канатного блока.

На основе результатов расчетов пространственной (трехмерной) модели была сформированная плоская (двухмерная) расчетная модель, которая позволила отследить направление главных растягивающих напряжений, которые возникают в канате в паре с канатным блоком, а также выполнить уточненную проверку аналитического расчета контактной задачи. Для этой цели был использованный прикладной проектно-расчетный комплекс SCAD Office.

Плоская модель была выполнена в графическом редакторе AutoCAD и импортированная через STEP формат в расчетный процессор Structure CAD, что входит в проектно-расчетный комплекс SCAD Office [12]. Плоская модель разбивалась на конечные элементы, на которые накладывались действующие силы, нагрузка и задавались свойства и характер их взаимодействия. Количество элементов конечно-элементной модели – 12895; количество узлов – 8332.

Постпроцессорная обработка результатов конечно-элементных расчетов позволяет легко получить важные характеристики решения. Так на рис. 8 и 9 получены карты распределения изополей эквивалентных и нормальных напряжений.

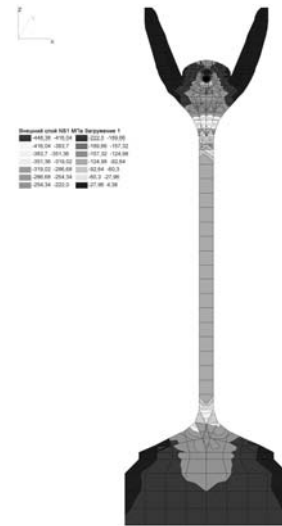


Рис. 8. Распределение изополей эквивалентных напряжений плоской модели  
 Fig. 8. The distribution of contour plots of equivalent stress plane model



Рис. 9. Распределение изополей нормальных напряжений плоской модели  
 Fig. 9. The distribution of the normal stress contour plots flat model

Анализ формы и характера изменения изополей эквивалентных напряжений, приведенное к эквивалентному сжатию по первой теории прочности самых больших нормальных напряжений (рис. 8), с учетом месторасположения зоны максимальных эквивалентных напряжений показывает, что в зависимости от соотношения действующих и предельных значений напряжений может возникнуть смятие рабочей поверхности профиля канатного блока, который контактирует с канатом.

В меру отдаления в осевом направлении от контактирующего торца поверхности каната согласно расположению изолиний рас-

пределения эквивалентных напряжений по глубине канатного блока наиболее вероятным направлением развития повреждений будет в районе галтельного перехода под ступицу канатного блока, при этом максимальное значение функции накопления трибоповреждений будет возникать на поверхности рабочего профиля канатного блока и определять характер изнашивания. В процессе работы пары «канатный блок – канат», вследствие смятия, происходит увеличения площади контактного взаимодействия, которое приводит к существенному уменьшению абсолютных значений, как контактных давлений, так и эквивалентных напряжений. При дальнейшем повышении нагрузки образовывается более менее сплошное пятно контакта, способно воспринимать нагрузку без ощутимых пластических деформаций, среднее давление на этом пятне возрастает и приводит в действие весь механизм упругих микроперемещений на поверхности сжатия.

Картина деформированного состояния плоско-напряженной (двухмерной) модели в целом совпадает с интуитивно ожидаемой.

НДС пряди каната при действии в нем продольной растягивающей силы и крутящего момента при комплексной нагрузке абсолютное значение удлинения пряди малое, что объясняется комбинацией нагрузок: растягивающая сила хочет растянуть пряди каната, а крутящий момент, напротив, – сжать ее. При этом распределение интенсивности напряжений имеет неоднородный характер. В центральном проводе напряжения распределяются равномерно по ее сечению. В проволоках 1-ой пряди присутствующие локальные максимумы в зонах контактного взаимодействия с соседними проволоками. Слой 2 характеризуется наличием максимумов интенсивности напряжений в контактных областях с проволоками 1-го слоя. Во внешнем слое максимум интенсивности напряжений смещен в сторону контактных областей проволок самого слоя.

Распределение максимальных контактных напряжений прослеживается в проволоках внешнего слоя, дистанции скольжения распределяются равномерно по длине проволок. Основными факторами, обуславливающими изнашивание при контактном взаимодействии, являются контактные давления и скорость скольжения. Последняя может быть опреде-

лена через дистанцию скольжения и время прикладывания нагрузки. Это позволяет обосновать закон изнашивания, то есть закон изменения размеров проволок в направлении оси, которая перпендикулярная к поверхности трения, в результате их формоизменения в процессе трения, которое позволит создать методы относительно расчетов канатов на долговечность.

Как видно из иллюстраций, полученные при расчетах значения напряжений и деформаций достаточно хорошо согласовываются с результатами как пространственной (трехмерной), так и плоско-напряженной (двухмерной) расчетных схем. Полученные значения численных решений контактной задачи практически совпадают со значениями полученных аналитических результатов [13], при этом относительная погрешность в среднем составляет около 4 %, что свидетельствует о приемлемой точности вычислений.

В результате проведенных исследований и анализа характеристик НДС пары «канатный блок – канат» с целью предотвращения явления изнашивания как каната, так и рабочего профиля канатного блока, предложена конструкция устройства для подъемного каната, который позволяет уменьшить контактные напряжения при работе канатного блока и каната, а также избежать проскальзывание подъемного каната [14, 15].

Нужно также заметить, что распределение контактных напряжений и деформаций, которые являются главными факторами, которые определяют характер и интенсивность изнашивания пары «канатный блок – канат», будет зависеть от качества, прочности и НДС металла поверхностных слоев [16]. Поэтому управление свойствами поверхностного слоя за счет обкатывания клиновым роликом рабочего профиля канатного блока возможно достичь повышение контактной прочности и тем самым повысить надежность и долговечность пары, узла и машины в целом [17 – 19].

## ВЫВОДЫ

1. Проведенный детальный численный анализ решения контактной задачи НДС прикладного характера, который играет важную роль в инженерных расчетах, в частности в машиностроительных, для расчетов на кон-

тактную прочность, а также оценке срока службы пары «канатный блок – канат».

2. Создано на основе разработанного метода и алгоритма эффективные компьютерные модели (конечно-элементное моделирование) для быстрого анализа влияния параметров задачи на особенности контактного взаимодействия (НДС) тел. Кроме этого, это решение важное при рассмотрении изнашивания жесткого тела при его контактом взаимодействии с упругим телом, когда происходит вдавливание канатных проволок с образованием соответствующих впадин (дефектов при смятии).

3. Предложенная и реализованная на ПЭВМ схема итерационного процесса уточнения области контакта с учетом деформации предельных поверхностей канатного блока и каната, а также условий контактных сопряжений деталей и изменением этих условий в процессе рабочих нагрузок.

4. Предложено на основе расчетов конструкцию подъемного каната (патент Украины на полезную модель № 66305) и рекомендовано проводить упрочнение рабочего профиля канатного блока поверхностной пластической деформацией с помощью технологии обкатывания клиновым роликом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pinegin S. 1961. O mehanizme kachenija pri silovom kontakte uprugih tel / S. Pinegin // Trudy. — M. : In-t mashinovedenija AN SSSR,— 13 s. — (Soveshhanie po kontaktnoj prochnosti mashinostroitel'nyh materialov).
2. Popov A. 2010. Novaja teorija kontaktnoj prochnosti uprugogo szhatyh tel / A. Popov // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. — Lublin,— Tom 12A. — 223—232.
3. Koval'skij B. 1967. Raschet detalej na mestnoe szhatie / B. Koval'skij. — Har'-kov : HVKIU,— 224.
4. Erdonmez C. 2009. Modeling and numerical analysis of the wire strand / C. Erdonmez, C. Imrak // J. of Naval Science and Engineering. — Vol. 5, №1. — 30—38.
5. Getman I. 2008. O metodah rascheta kana-tov. Zadacha rastjazhenija-kruchenija / I.

- Getman, J. Ustinov // Podzemnye mashiny i mehanizmy. — T. 72, vyp. 1. — 81—90.
6. Borovkov A. 2005. Konechno-jelementnoe vychislenie jeffektivnyh mehanicheskikh harakteristik stal'nogo kanata na osnove modelirovanija mikrostruktury i mnozhestvennogo kontaktnogo vzaimodejstvija / A. Borovkov, D. Klimshin// Fundamental'nye issledovanija v tehniceskikh universitetah. — Sankt – Peterburg : SPbGPU,— 232—233.
7. Kuz'menko A. 2007. Kontakt, trenie i iznos smazannyh poverhnostej: monografija / A. Kuz'menko, O. Diha. — Hmel'nickij : HNU,— 344.
8. Sorokatyj R. 2009. Metod tribojelementov: monografija / R. Sorokatyj. — Hmel'nickij: HNU,— 242.
9. Sorokatyj R. 2007. Reshenie iznosokontaktnyh zadach metodom tribojelementov v srede konechno-jelementnogo paketa ANSYS / R. Sorokatyj // Problemi tribologii. — Hmel'nic'kij,— №3. — 9—17.
10. Zamrij A. 2006. Proektirovanie i raschet metodom konechnyh jelementov trehmer-nyh konstrukcij v srede APM Structure 3D / A. Zamrij. — M.: APM,— 288.
11. APM WinMachine. Sistema rascheta i proektirovanija detalej i konstrukcij metodom konechnyh jelementov. Versija 9.6. Rukovodstvo pol'zovatelja [Jelektronnyj resurs]. — Jelektron. tekstovye dannye. — Rezhim dostupu : <http://www.apm.ru>.
12. SCAD Office. Vychislitel'nyj kompleks SCAD / [V. Karpilovskij, J. Kriksunov, A. Maljarenko i dr.] — M. : ASV, 2004. — 592.
13. Popov A. 2011. Kontaktnaja zadacha naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija tel pri rabote stal'nogo kanatnogo bloka i trosa / A. Popov, B. Butakov, D. Marchenko // Problemi tribologii. — Hmel'nic'kij,— № 1. — 29—36.
14. Hertz H. 1882. Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte / H. Hertz // Verhandlungen des Vereines zur Beförderung des Geverbefleisses. — Berlin. Nov. — 449.
15. Pat. 66305 Ukraïna, MPK V 66 D 3/04. Pidjomnij kanat / O. Popov, B. Butakov, D. Marchenko, O. Savenkov; zajavnik i vlasnik Marchenko D. — № u201108208 ; zajavl. 30.06.2011 ; opubl. 26.12.2011, Bjul. № 24.
16. Butakov B. 1992. Osnovnye principy tehnologii impul'snogo i maloskorostnogo

vozdeystvija na strukturu i svojstva metallov i splavov: dis. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk: 05.02.01 / Butakov Boris Ivanovich. — K.,— 533.

17. Butakov B. 2010. Optimizacija parametrov poverhnostnogo uprochnenija obkatyvaniem rolikami kanatnyh blokov s cel'ju povyshenija ih kontaktnoj prochnosti / B. Butakov, D. Marchenko // Problemi tribologii. — Hmel'nic'kij, — № 3. — 99—107.

18. Popov A. 2011. Kontaktnaja prochnost' zubchatyh muft s prodol'no modifitsirovannymi zub'jami / A. Popov, O. Savenkov // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. — Lublin. — Tom 13A. — 167—176.

19. Butakov B. 2008. Razrabotka sposoba obkatyvaniya rolikami stal'nyh detalej s cel'ju povyshenija ih kontaktnoj prochnosti / B.I. Butakov, D.D. Marchenko // MOTROL. Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Polish Academy of Sciences Branch of Lublin Ropczyce School of Engineering and Management. - Lublin. - Vol. 10V. - 15-28.

## NUMERICAL SOLUTION OF CONTACT PROBLEMS OF STRESS-STRAIN STATE BODIES AT WORK STEEL BLOCK ROPE AND ROPE

**Summary.** The paper presented the results of studies of the stress-strain state at work steel cable block and channel Univ. Using finite element modeling performed numerical solution spatial and plane-hard contact problem using application software systems APM WIN Machine and Structure CAD. Analysis of static and dynamic load-nomic couples showed that ma-a maximal level of contact stress (stress field), and therefore the greatest intensity trybokontaktnoho wear at-work profile is on the cable block ku, namely the toroidal and conical surface due to a jam rope Their work is returned.

**Key words:** contact problem, the stresses, deformation, finite element modeling, trybokontaktnyy wear, rope block rope.