

Экспериментальная верификация алгоритма расчета оболочки эластовинтового движителя

© М.В. Попков, Ф.Д. Сорокин, С.А. Бриезде

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Алгоритм решения задачи о взаимодействии сетчатой оболочки и роликов, создающих винтовую структуру на поверхности эластовинтового движителя, был верифицирован прямым натурным экспериментом. Поскольку проверялись не результаты решения, а разработанный для его получения алгоритм, в схему эксперимента были внесены упрощения. Вместо системы роликов в поверхность сетчатой оболочки вдавливался всего один стальной шарик, причем он вдавливался с наружной стороны, хотя ролики вдавливаются в оболочку изнутри. При верификации рассматриваемого алгоритма внесенные изменения незначительны, так как при расчете и в эксперименте рассматриваются идентичные схемы нагружения. Приведено подробное описание эксперимента и обработки полученных результатов. Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод о правильности алгоритма, используемого для решения задачи о взаимодействии жестких тел с оболочкой эластовинтового движителя.

Ключевые слова: резинокордная оболочка, шнекоход, эластовинтовой движитель

Введение. Шнекороторные вездеходы (или шнекоходы) обладают свойством уникальной проходимости в трудных грунтовых условиях, таких как глубокий снег, песок, болотистые и илистые участки местности. Для некоторых разновидностей опорных оснований только эластовинтовой движитель способен обеспечивать перемещение машины. С момента изобретения первого шнекохода в 1868 г. конструкция не подвергалась значительным изменениям.

Однако недавние исследования [1, 2] показали, что возможность варьирования таких конструктивных параметров, как угол наклона винтовой линии и высота лопасти, может значительно улучшить адаптивные качества движителя. С этой целью было предложено [3] заменить традиционный жесткий шнек эластичной резинокордной оболочкой, нагруженной внутренним давлением. На поверхность этой оболочки изнутри воздействуют ролики вращающихся механизмов (рис. 1). Такой движитель был назван эластовинтовым.

Принцип его работы заключается в следующем: ролики формируют волну на поверхности резинокордной оболочки, при этом создается бегущая волна, имитирующая вращение шнека (сама оболочка не вращается). Это один из возможных волновых принципов движения, которые подробно описаны в книге А.И. Добролюбова [4]. Параметры

такого «шнека» можно адаптировать за счет наклона механизмов генерации волны и/или смещения роликов друг относительно друга.

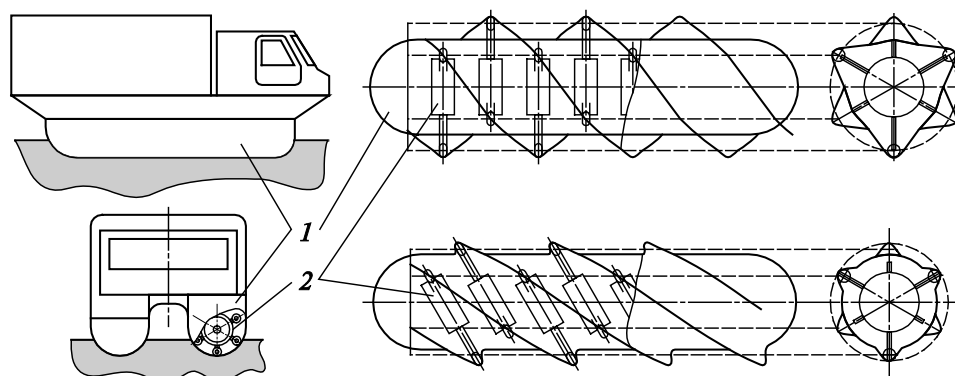


Рис. 1. Схема эластовинтового движителя:
1 — резинокордная оболочка; 2 — ролики

Конструкция эластовинтового движителя находится на начальном этапе разработки, однако ей уделяется большое внимание в связи с необходимостью освоения Крайнего Севера. В статье [5] описывается экспериментальное исследование возможности реализации такого движителя. В работе [6] рассчитано лишь начальное напряженно-деформированное состояние резинокордной оболочки движителя (под действием внутреннего давления). Там же предложена методика вычисления углов укладки нитей, усилий в нитях и определения формы меридиана оболочки в начальном состоянии.

Результаты указанных работ свидетельствуют о том, что ролики при взаимодействии с оболочкой должны формировать волну довольно большой амплитуды, иначе движитель не будет эффективным. Это означает, что задача расчета напряженно-деформированного состояния оболочки в зоне контакта с роликами является геометрически нелинейной.

В статье [7] задача о взаимодействии ролика и резинокордной оболочки движителя решается в обращенной постановке: контактное давление со стороны ролика на оболочку принимается известным и на основе этого определяются форма деформированной поверхности оболочки и натяжение в нитях.

Цель данной статьи — экспериментальная проверка алгоритма решения задачи о воздействии на сетчатую оболочку эластовинтового движителя локальной нагрузки, создаваемой вдавливаемым в оболочку твердым телом. Влияние резины не учитывалось, поэтому фактически рассматривалась сетчатая оболочка, т. е. термины «резинокордная оболочка» и «сетчатая оболочка» в данной работе несут одинаковый смысл.

Описание экспериментальной установки. Для проведения испытаний была сконструирована установка с моделью резинокордной оболочки и нагружающим устройством (рис. 2).

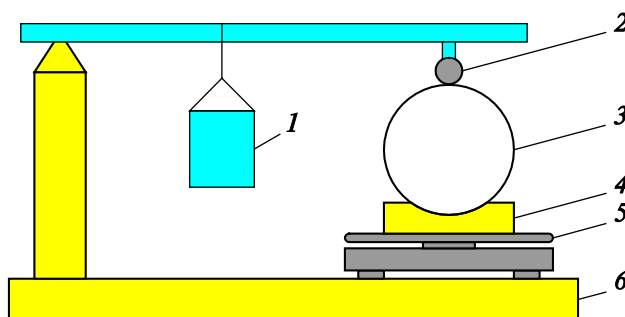


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — груз; 2 — стальной шарик; 3 — оболочка; 4 — опора;
5 — электронные весы; 6 — основание

Сетчатая оболочка была изготовлена с использованием тонкостенной эластичной камеры цилиндрической формы. В качестве кордов применяли строительную армирующую сетку из стекловолокна с ячейками 3×3 мм, скрученную в цилиндр и склеенную небольшим швом с помощью резинового клея. Для достижения правильной цилиндрической формы на торцах сетчатого цилиндра были установлены специально изготовленные круговые деревянные диски (рис. 3).



Рис. 3. Экспериментальная модель резинокордной оболочки

Воздушное давление в полости эластичной камеры создавалось с помощью механического насоса и контролировалось посредством манометра ММП-60 с пределами абсолютной погрешности измерения ± 3 мм рт. ст. ($\pm 0,4$ кПа).

При подаче давления в полость камеры полученная конструкция сохраняет цилиндрическую форму (диаметр цилиндра 75 мм), при этом за счет давления на торцевые диски возникает осевое усилие и устанавливается так называемый равновесный угол наклона нитей к оси оболочки, составляющий $54,7^\circ$ (рис. 4), что соответствует явлению, описанному в работе [8].

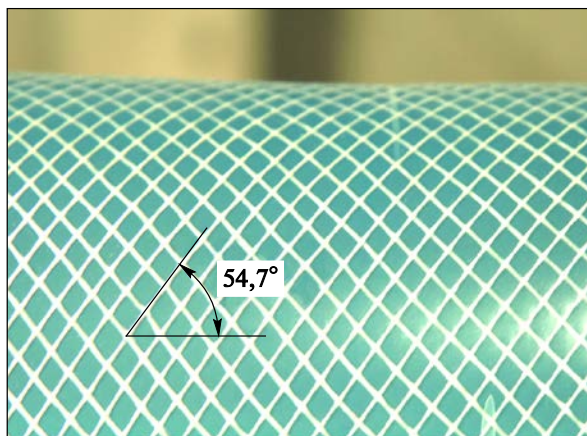


Рис. 4. Проверка угла наклона нитей в экспериментальной модели сетчатой оболочки

Оболочка устанавливается в пенопластовую опору с выточенной под ее размер полостью на силоизмеритель, в качестве которого использовались электронные весы SF-400 с точностью измерения $\pm 0,0981$ Н.

Нагружающее устройство состоит из стального шарика известного диаметра (10 мм), рычага и грузов. Масса грузов и размер рычага не важны, поскольку имеется силоизмеритель. Отметим, что длина рычага достаточна, чтобы при его повороте относительно точки закрепления горизонтальное перемещение шарика было пренебрежимо мало по сравнению с вертикальным перемещением.

Описание методики проведения измерений и обработки эксперимента. Перемещение шарика измерялось фотографическим методом: по двум фотографиям (в ненагруженном и нагруженном состояниях), снятым с одного ракурса, определялось перемещение нескольких точек.

Для этого была составлена программа в MATLAB с использованием дополнения Image Processing Toolbox [9, 10], которое позволяет загружать группу изображений, полученных при различных значениях нагрузки, и поочередно анализировать их. За отсчетную конфигурацию — изображение, с которым впоследствии сравниваются остальные, — принимается первая фотография (с внутренним давлением, но при нулевой нагрузке от вдавливаемого тела). Программа имеет графический интерфейс, однако выбор точек и измерение наблюдатель осуществлял вручную.

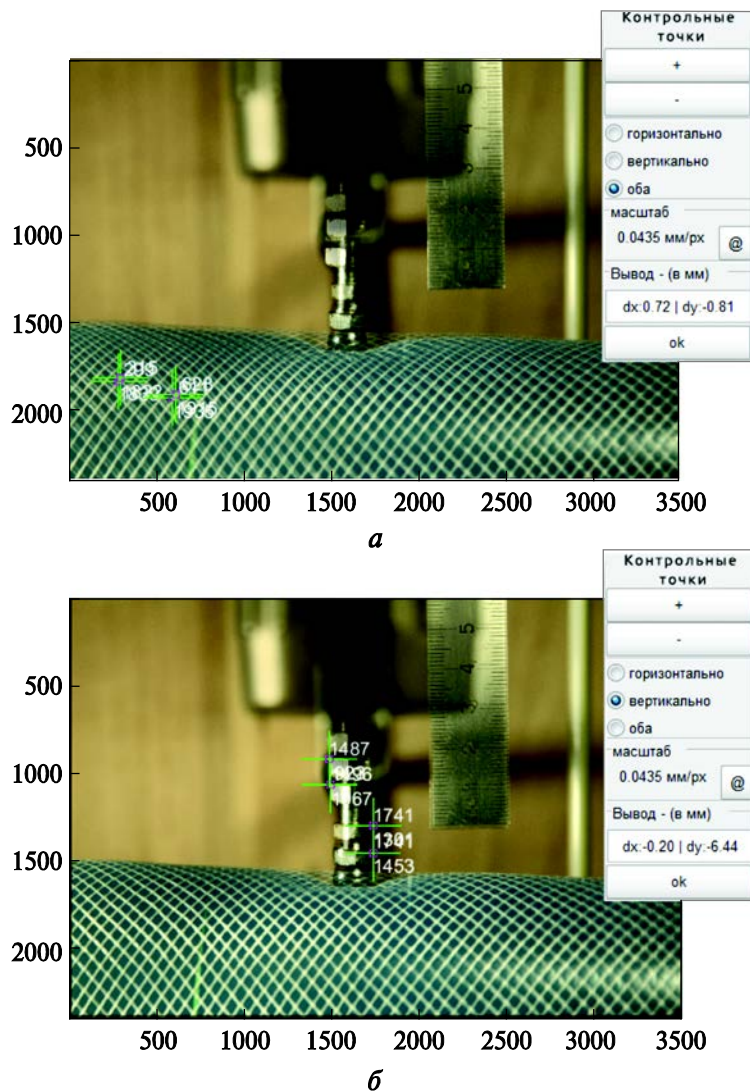


Рис. 5. Наложение и совмещение фотографий двух положений шарика (с нагрузкой и без нее) по контрольным точкам:

a — выбор точек; *б* — результирующее совмещенное изображение

Расстояния между положением шарика в начальный момент при отсутствии груза и в конечном положении определялись по совмещенному изображению. При наложении фотографий учитывалось смещение оболочки, связанное с неидеальностью опоры и закреплением фотоаппарата. На рис. 5, *a* приведен пример такого совмещения. Для того чтобы совместить две фотографии, на поверхности оболочки были предварительно отмечены несколько контрольных точек на достаточном для затухания краевого эффекта расстоянии от прикладываемой нагрузки. Затем в программе на первом и втором

изображении с помощью мыши были выбраны пары точек. По введенным данным программа передвигает вторую фотографию так, чтобы точки каждой пары совпали. В результате было получено совмещенное изображение из двух наложенных фотографий (рис. 5, б).

На совмещенном изображении выбирали точки начального и конечного положений вдавливаемого шарика для определения его перемещения. Для получения более точного результата выбирали несколько пар точек с последующим осреднением расстояний между ними.

Перемещение измерялось в пикселях, т. е. цифрами у каждой выбранной точки на рисунках показаны ее координаты в пикселях, отсчитываемые от верхнего левого угла. Для получения перемещения в миллиметрах в кадре присутствует измерительная линейка, расположенная с вдавливаемым шариком на одном расстоянии от фотоаппарата. По первой фотографии определяется масштаб (мм/пиксель) для всех остальных фотографий (рис. 6). В процессе эксперимента положение фотоаппарата, оболочки и фокусное расстояние оставались неизменными.

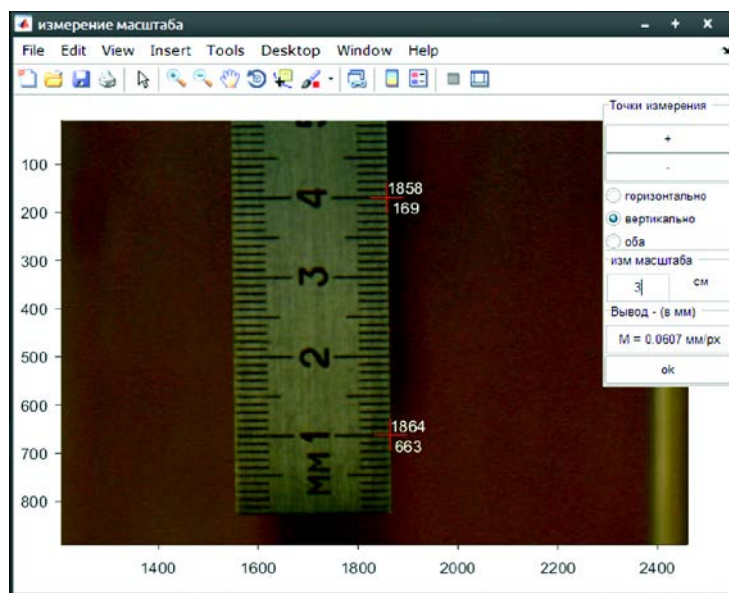


Рис. 6. Определение масштаба изображений

Испытание было проведено на трех оболочках одного начального размера при разной нагрузке и семи уровнях внутреннего давления. Полученные при этом графики представлены на рис. 7. Линии построены с помощью полинома 2-й степени с применением встроенной в MATLAB функции `polyfit()` [11, 12], использующей метод наименьших квадратов, однако получившиеся линии достаточно близки к прямым.

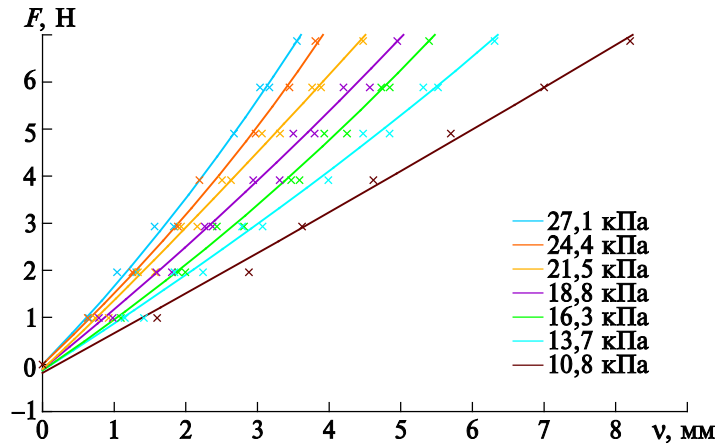


Рис. 7. Зависимости нагрузка — перемещение стального шарика, полученные в результате обработки экспериментальных данных (x) при различных значениях внутреннего давления

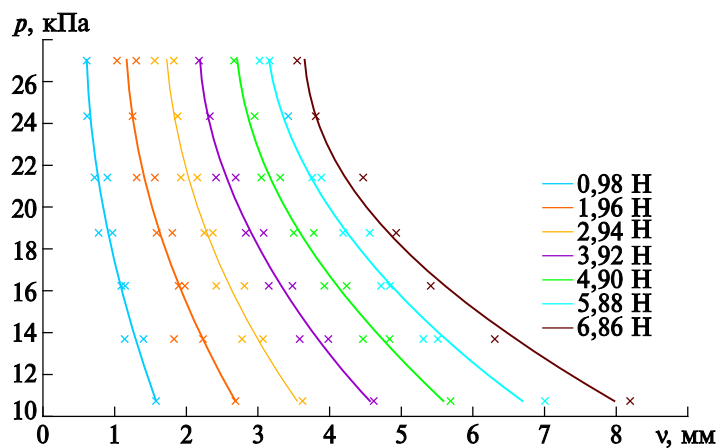


Рис. 8. Графики «срезов» результатов эксперимента (x) по нагрузкам

Результаты экспериментов представлены также в виде графиков «срезов» по нагрузкам (рис. 8).

Сопоставление результатов эксперимента с решением линейной краевой задачи. Для того чтобы оценить достоверность результатов эксперимента, было проведено их сопоставление с численным решением, выполненным по описанной в работе [6] методике, которая сводится к разложению внешней нагрузки в тригонометрический ряд по окружной координате с последующим решением линейной краевой задачи для системы линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dy_k}{ds} = [F_k]y_k + g_k,$$

где \mathbf{y}_k — вектор состояния, содержащий шесть компонент; k — номер гармоники; s — осевая координата; $[\mathbf{F}_k]$ — матрица системы линейных дифференциальных уравнений размером 6×6 ; \mathbf{g}_k — нагрузочный вектор, в который входят коэффициенты разложения внешней нагрузки в тригонометрический ряд.

Отметим, что решалась не контактная задача, а задача, обратная ей. Нагрузка от ролика задавалась в виде параболоида, опирающегося на пятно контакта. Параметрами нагружения являлись максимальное значение контактного давления в центре пятна контакта и радиус границы этого пятна. Равнодействующая указанной распределенной нагрузки является силой, приложенной к стальному шарикю.

Решение проводилось в программном пакете Wolfram Mathematica [13], при этом каждая гармоника рассматривалась отдельно, а затем результаты суммировались с учетом умножения на соответствующие тригонометрические функции. В качестве краевых принимались условия отсутствия перемещений на торцах оболочки (краевые условия не играют роли в этой задаче, так как на удалении от места приложения внешней нагрузки численное решение быстро убывает). На рис. 9 приведена полученная деформированная форма оболочки при силе $F = 5$ Н и диаметре пятна контакта 6 мм.

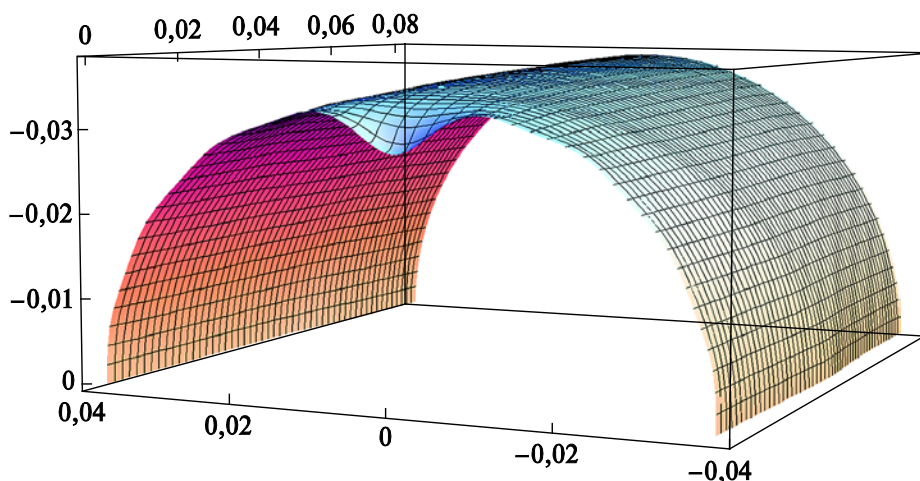


Рис. 9. Деформированная форма оболочки диаметром 75 мм, вычисленная по линейной теории при силе $F = 5$ Н и внутреннем давлении $p = 10,8$ кПа

Для каждого значения давления был выполнен один расчет при заданной нагрузке, а затем, поскольку задача линейна, построены прямые (рис. 10). На те же графики нанесены результаты эксперимента. Как видно из данных на рисунке, экспериментальные точки достаточно близки к построенным прямым (с учетом того, что расчет выполнен

с допущениями). Например, диаметр области контакта задан приблизительно (на основе наблюдений эксперимента) и неизменным, хотя он зависит от внутреннего давления и нагрузки.

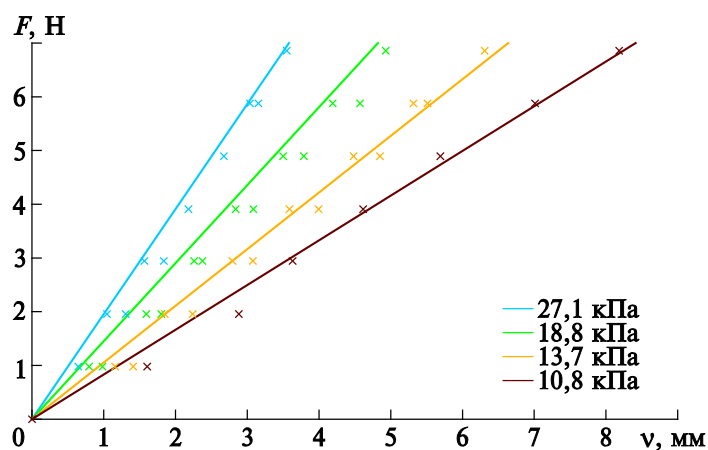


Рис. 10. Результаты эксперимента (x) и зависимости, полученные с применением линейной теории, при различных значениях внутреннего давления

С допущением о неизменности размеров пятна контакта, вероятно, связаны заметные отклонения экспериментальных точек от прямой на начальном участке нагружения при давлении 10,8 кПа. На конечном участке этапа нагружения ($F = 4 \dots 8$ Н) той же прямой размер пятна контакта мало зависит от нагрузки, поэтому здесь совпадение расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительное.

Сопоставляя расчетные и экспериментальные значения, можно утверждать, что схема сетчатой оболочки и построенный алгоритм вполне пригодны для исследования механических явлений в зоне контакта оболочки эластовинтового движителя с роликами. Кроме того, по результатам проведенного эксперимента могут быть верифицированы и другие расчеты, например выполненные методом конечных элементов.

Заключение. Актуальность разработки эластовинтового движителя обосновывается необходимостью освоения Крайнего Севера. Во введении описан принцип действия движителя и обозначены расчетные задачи, возникающие при его разработке.

Алгоритм решения задачи о взаимодействии оболочки движителя и роликов, создающих винтовую структуру на поверхности оболочки движителя, был верифицирован прямым натурным экспериментом. Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод о правильности алгоритма расчета оболочки движителя при ее взаимодействии с твердыми телами.

Результаты выполненного эксперимента могут быть использованы для контроля и других алгоритмов решения рассмотренной задачи, основанных, например, на методе конечных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бяков К.Е., Чан Ки Ан, Сорокин Ф.Д., Машков К.Ю. Транспортное средство высокой проходимости с эластовинтовым двигателем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2014, № 5, с. 37–42.
- [2] Наумов В.Н., Бяков К.Е. Улучшение роторно-винтового двигателя мобильного робота путем использования технологий эластичной механики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, вып. 10, с. 1–6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-416.
- [3] Бяков К.Е. *Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров эластомеханического роторно-винтового двигателя транспортно-технологического средства*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015, 181 с.
- [4] Добролюбов А.И. *Скольжение, качение, волна*. Москва, Наука, 1991, 176 с.
- [5] Бяков К.Е., Сорокин Ф.Д., Машков К.Ю., Попков М.В. Стенд для исследования контактного взаимодействия в системе грунт — эластичная оболочка — генератор волны эластовинтового двигателя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 8 (665), с. 42–48.
- [6] Чан Ки Ан. *Разработка методов расчета безмоментных сетчатых оболочек вращения с несимметрично уложенными нитями*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2015, 146 с.
- [7] Сорокин Ф.Д., Попков М.В., Машков К.Ю., Бяков К.Е. Расчет больших перемещений резинокордной оболочки эластовинтового двигателя от действия локальной нагрузки бессеточным методом. *Инженерный вестник*, 2014, № 12, с. 144–150. URL: <http://engbul.bmstu.ru/doc/749198.html> (дата обращения 02.09.2019).
- [8] Бидерман В.Л. *Механика тонкостенных конструкций: статика*. 2-е изд. Москва, URSS, 2017, 496 с.
- [9] Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. *Цифровая обработка изображений в среде MATLAB*. Москва, Техносфера, 2012, 985 с.
- [10] The MathWorks Inc. *MATLAB® App Building*. 2019, 518 с. URL: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf (дата обращения 02.09.2019).
- [11] Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. *Matlab 7*. Санкт-Петербург, БХВ-Петербург, 2005, 1104 с.
- [12] Дьяконов В.П. *MATLAB. Полный самоучитель*. Москва, ДМК Пресс, 2012, 768 с.
- [13] Дьяконов В.П. *Mathematica 5.1/5.2/6. Программирование и математические вычисления*. Москва, ДМК Пресс, 2008, 574 с.

Статья поступила в редакцию 25.11.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Попков М.В., Сорокин Ф.Д., Бриед С.А. Экспериментальная верификация алгоритма расчета оболочки эластовинтового двигателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-12-1938>

Попков Михаил Викторович — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: mihpmv@bmstu.ru

Сорокин Фёдор Дмитриевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 публикаций в отечественных и международных научных журналах. e-mail: sorokin_fd@mail.ru

Бриде Светлана Алексеевна — ассистент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: svetbrie@bmstu.ru

Experimental verification of the algorithm for calculating the shell of an elasto-screw propulsion unit

© M.V. Popkov, F.D. Sorokin, S.A. Briede

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The algorithm for solving the problem of the interaction of the mesh shell and rollers creating a helical structure on the surface of the elasto-screw propulsion unit was verified by a direct field experiment. Since it was the algorithm, developed to obtain the solution of the problem, tested, not the results of solving it, a number of simplifications were made to the experiment design. Instead of a system of rollers, only one steel ball was pressed into the surface of the mesh shell, and it was pressed from the outside, although the rollers are pressed into the shell from the inside. When verifying the algorithm under consideration, the introduced changes are not significant, since identical loading schemes are considered in the calculation and in the experiment. A detailed description of the experiment and result processing is given. A satisfying agreement between the experimental and calculated data allows us to conclude that the algorithm used to solve the problem of the interaction of rigid bodies with the shell of an elasto-screw propulsion unit is correct.

Keywords: rubber-cord shell, auger, elasto-screw propulsion unit, experiment

REFERENCES

- [1] Byakov K.E., Chan Ki An, Sorokin F.D., Mashkov K.Yu. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2014, no. 5, pp. 37–42.
- [2] Naumov V.N., Byakov K.E. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, iss. 10, pp. 1–6. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-10-416
- [3] Byakov K.E. *Razrabotka metodiki i izbor ratsionalnykh parametrov elastomekhanicheskogo rotorno-vintovogo dvizhitelya transportno-tekhnologicheskogo sredstva*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methodology and selection of rational parameters of elastomechanical rotary screw propulsion unit of transport and technological means. Cand. tech. sc. diss.]. Moscow, 2015, 181 p.
- [4] Dobrolyubov A.I. *Skolzhenie, kachenie, volna* [Sliding, rolling, wave]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 176 p.
- [5] Popkov M.V., Sorokin F.D., Mashkov K.Yu., Byakov K.E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 8 (665), pp. 42–48.
- [6] Chan Ki An. *Razrabotka metodov rascheta bezmomentnykh setchatykh obolochek vrashcheniya s nesimmetrichno ulozhennymi nityami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods for calculating the mesh momentless shells of revolution with asymmetrically laid yarns. Cand. tech. sc. diss.]. Moscow, 2015, 146 p.
- [7] Popkov M.V., Sorokin F.D., Byakov K.E., Mashkov K.Iu. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*, 2014, no. 12, pp. 144–150. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/749198.html> (accessed September 2, 2019).

- [8] Biderman V.L. *Mekhanika tonkostennykh konstruksiy: statika* [Mechanics of thin-walled structures: statics]. Moscow, URSS Publ., 2017, 496 p.
- [9] Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. *Digital image processing using MATLAB*. USA, Gatesmark Publ., 2009 [In Russ.: Gonzalez R.C., Woods R.E., Eddins S.L. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2012, 985 p.].
- [10] The MathWorks Ink. *MATLAB® App Building*, 2019, 518 p. Available at: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf (accessed September 2, 2019).
- [11] Anufriev I.E., Smirnov A.B., Smirnova E.N. *Matlab 7*. St. Petersburg, BXV-Peterburg Publ., 2005, 1104 p.
- [12] Dyakonov V.P. *MATLAB. Polniy samouchitel* [MATLAB. Complete teach-yourself book]. Moscow, DMK Press Publ., 2012, 768 p.
- [13] Dyakonov V.P. *Mathematica 5.1/5.2/6. Programmirovaniye i matematicheskie vychisleniya* [Mathematica 5.1/5.2/6. Programming and Mathematical Computing]. Moscow, DMK-Press Publ., 2008, 574 p.

Popkov M.V., Assist. Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: mihpmv@bmstu.ru

Sorokin F.D., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 70 research publications in national and international journals. e-mail: sorokin_fd@mail.ru

Briede S.A., Assist. Lecturer, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University. e-mail: svetbrie@bmstu.ru