

УДК 539.3

doi:10.20998/2413-4295.2016.12.11

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ТЕЛ

*Н. Б. СКРИПЧЕНКО\**, *Н. Н. ТКАЧУК*, *А. А. АТРОШЕНКО*

*Кафедра теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, УКРАИНА*  
*\*e-mail: negrobova@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** В работе проведен и описан ряд экспериментальных исследований с применением чувствительных к давлению пленок для обоснования применимости разработанного варианта метода граничных интегральных уравнений. Сравнение распределений контактных давлений, полученных экспериментально и при численном решении методом граничных элементов, подтвердило полное качественное и удовлетворительное количественное соответствие расчетных и экспериментальных исследований. Погрешность в определении площадей контакта и максимальных контактных давлений не превысила 10 %.

**Ключевые слова:** контактное взаимодействие, метод граничных элементов, напряженно-деформированное состояние, шероховатость, гидрообъемная передача, чувствительные к давлению пленки.

## NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF CONTACT FOR BODIES OF COMPLEX SHAPE

*N. SKRIPCHENKO\**, *M. TKACHUK*, *O. ATROSHENKO*

*Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** This work delivers results of experimental studies performed in order to justify the validity of the developed version of the boundary element method that accounts for the compliance of the intermediate layer. Experimental investigation of contact interaction of complex shaped bodies in the presence of local compliance of conjugate surfaces has been conducted on a prototype of a hydrovolumetric drive, for which the contact area and the magnitude of the contact pressure were determined by means of pressure sensitive films. In order to capture the entire domain where contact pressure is applied and their maximal values and therefor for the sake of measurement error reduction each test is made using two types of contact films: MS and HS. It was demonstrated that the increased compliance of the intermediate layer results in contact over a larger area and leveling of the maximal contact pressure pike. With the increase of pressing force both the size of the contact zone and the values of contact pressure grow. Comparison of contact pressure distributions obtained experimentally and from numerical boundary element method solution confirmed full qualitative and quantitative correspondence of the experimental and numerical results. The discrepancy in contact area and maximal contact pressure was less then 10%. The results are summarised in a curve chart that contains correlation between the size of the contact area and the value of the maximal contact pressure for different local compliances of the contact layer.

**Keywords:** contact interaction, boundary element method, stress-stain state, roughness, hydrovolumetric drive, pressure sensitive films

### Введение

В современном машиностроении контактное взаимодействие – один из основных способов передачи механического воздействия между деталями машин в процессе эксплуатации. При этом для передачи сложных видов движения, увеличения нагрузочной способности, а также уменьшения максимальных контактных давлений при проектировании новых изделий их форма усложняется. Это порождает проблему выбора рационального способа анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) контактирующих сложнопрофильных тел, поскольку для таких тел нельзя напрямую применить традиционные методики, основанные на теории Герца [1, 2]. Также характер распределения контактных давлений и величина их площадок чувствительны к учету дополнительных

факторов, таких как шероховатость, наличие прокладок, напылений и т.д.

Для анализа НДС при контактном взаимодействии с учетом этих факторов разрабатываются различные численные методы. Наиболее распространенные из них – метод конечных элементов (МКЭ) [3, 4] и метод граничных элементов (МГЭ) [5-8].

В работе [9] предложен вариант метода граничных элементов для решения контактных задач, позволяющий учитывать произвольную форму первоначального зазора между сопрягаемыми телами, что позволяет расширить область исследуемых задач на более широкий класс объектов. Также предложена модель учета локальной податливости промежуточного слоя между контактирующими телами, основанная на модели Винклера [10]. При помощи специализированного программно-

модельного обеспечения, разработанного при реализации предложенной математической модели, решен ряд прикладных задач.

Полученные численные результаты нуждаются в подтверждении данными экспериментальных исследований.

В данной работе проведен и описан ряд экспериментальных исследований для обоснования применимости разработанного варианта МГЭ с учетом наличия податливости промежуточного слоя между контактирующими телами.

### Цель работы

Цель работы состоит в расчетно-экспериментальном исследовании контактного взаимодействия сложнопрофильных тел при наличии между ними упругого слоя и в обосновании на этой основе точности проведенного комплекса численных исследований, выполненных при помощи метода граничных элементов.

### Изложение основного материала

В работе экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных тел с учетом локальной податливости сопрягаемых поверхностей (обусловлена наличием либо шероховатости, либо прокладок, напылений, пленок и т.д.) проведено на опытных образцах элементов гидрообъемной передачи. В процессе экспериментальных исследований определялись величины контактных площадок и контактных давлений методом контактных отпечатков с применением чувствительных к давлению пленок. Эти пленки разработаны компанией Fuji [www.fujifilm.com] и позволяют измерять давления при статическом нагружении или их максимальные значения при динамическом. Принцип их работы состоит в том, что при приложении контактного усилия микрокапсулы в цветообразующем слое разрушаются, и их вещество взаимодействует с веществом цветопроявляющего слоя. Интенсивность полученного цвета зависит от величины приложенного усилия, т.к. на пленках имеются микрокапсулы различных размеров (от микронов до десятков микронов), разрушающиеся при различных давлениях. Общее строение и принцип действия чувствительных к контакту пленок показаны на рис. 1.

В качестве контактирующих тел использованы настоящий шаровой поршень, извлеченный из гидрообъемной передачи ГОП-900 [www.morozovkmdb.com], и блок из плексигласа, свойства материала которого позволяют при незначительных прижимающих усилиях отследить характерные изменения размеров контактных площадок и распределений контактных давлений. Промежуточный упругий слой моделировался с помощью резины, величина податливости которой

определена экспериментально ранее [11]. При этом во время проведения ряда экспериментов для варьирования локальной податливости между контактирующими телами использовалось различное количество слоев резины, а для соответствующих численных исследований – значения податливостей слоев складывались.

Для измерения контактных давлений необходимо первоначально выбрать тип пленки, исходя из ожидаемых значений измеряемых величин (см. табл. 1). Каждому типу пленок ставятся в соответствие зависимости интенсивности цвета в пределах от 0,1 до 1,6 от прикладываемого давления.

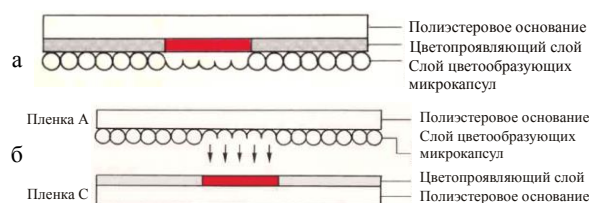


Рис. 1 – Строение и принцип действия одинарных (а) и составных (б) контактных пленок

Таблица 1 – Виды пленок Fuji и их параметры

Тип пленки		Диапазон измеряемых давлений, МПа
Составные	Ultra Super Low Pressure (LLW)	0.2-0.6
	Super Low Pressure (LLW)	0.5-2.5
	Low Pressure (LW)	2.5-10
	Medium Pressure (MW)	10-50
Одинарные	Medium Pressure (MS)	10-50
	High Pressure (HS)	50-130
	Super High Pressure (HHS)	130-300

Экспериментальная установка (рис. 2) обеспечивает прижатие шарового поршня к плоскости ответной детали. Блок из плексигласа фиксируется на специально собранном приспособлении из элементов комплекта универсальных сборочных приспособлений. Усилие прикладывается с помощью винтовой пары и передается через специальный вкладыш, исключая прокручивание поршня, а измеряется за счет наклеенных на винт тензодатчиков, подсоединенных к тензометрическому прибору ИСД-3, показания которого протарированы (с применением динамометра).

Как отмечено выше, разные типы контактных пленок имеют различные диапазоны измеряемых давлений, которые в большинстве случаев не пересекаются. Поэтому для захвата большей области распределения контактных давлений и их значений, а соответственно для снижения погрешности проводимого эксперимента в работе при каждом нагружении используются пары пленок типа MS и HS, диапазоны измеряемых давлений для которых



Рис. 2 – Общий вид экспериментальной установки для исследования контактного взаимодействия шарового поршня с беговой дорожкой радиальной ГОП

составляют 10-50 МПа и 50-130 МПа соответственно (см. табл. 1). Таким образом, проведение экспериментальных измерений осуществляется в следующей последовательности: устанавливается и фиксируется блок из плексигласа, моделирующий беговую дорожку радиальной ГОП-900, с которой находится в сопряжении в реальной конструкции шаровой поршень; в месте ожидаемого контакта размещаются пары контактных пленок, на которые нанесены метки для их последующего совмещения, и слой (или слои) резины; проводится установка поршня на плоскости и его закрепление, для исключения его проворачивания; приложение и снятие заданного усилия с помощью винтовой пары; извлечение контактных пленок и их оцифровка; проведение анализа полученных контактных отпечатков и определение влияния локальной податливости на характер распределения контактных давлений и величину контактных пятен.

### Анализ результатов

В ходе эксперимента при варьировании величины промежуточного податливого слоя, а также прижимающего усилия получены разные пары контактных отпечатков и проведена их оцифровка (рис. 3). Видно, что контактные пятна, полученные на пленках меньшей чувствительности, хорошо отображают форму и границы пятен контакта, однако имеют белую область в центральной зоне. Это объясняется тем, что пленка в этой области «засвечена», т.к. там действуют контактные давления, превышающие верхний порог ее чувствительности. Для оценки контактных давлений в этой центральной зоне и их максимальных значений используются уже данные, полученные на пленках с более высоким диапазоном. Т.о., в ходе эксперимента обосновано применение двух типов пленки одновременно в едином пакете для оценки характера распределения контактных давлений, их максимальных значений и размеров пятен контакта. Это обстоятельство отличает методику исследований от традиционных (с применением одного типа пленки или нескольких, но устанавливаемых поочередно).

На полученных оцифрованных контактных пятнах видно, что с использованием большего количества слоев (увеличением податливости промежуточного слоя) размеры контактных пятен растут, а максимальные контактные давления уменьшаются, и пики в распределениях сглаживаются. С увеличением же прижимающего усилия наблюдается рост максимальных контактных давлений и увеличение площадки контакта.

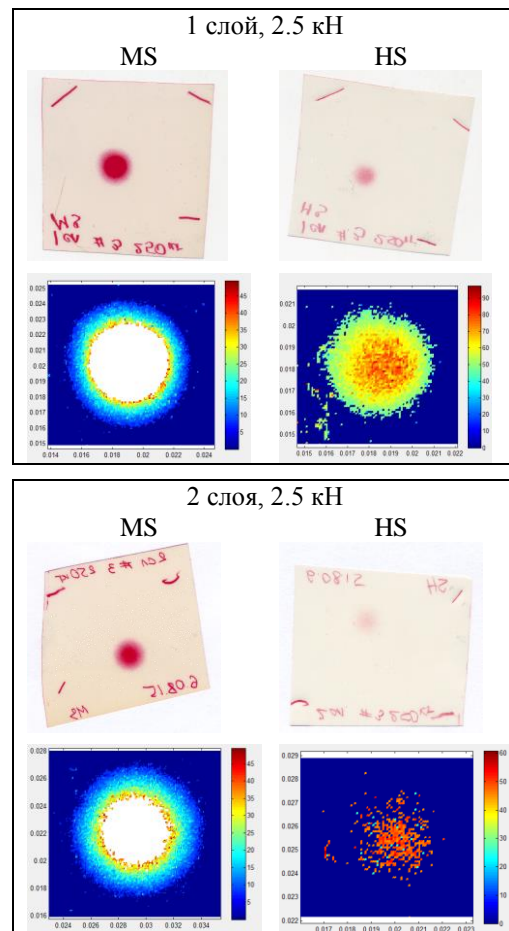


Рис. 3 – Контактные отпечатки на чувствительных пленках Fuji в сопряжении шарового поршня с беговой дорожкой и их оцифровка

Сравнение распределений контактных давлений, полученных, с одной стороны, экспериментально и, с другой стороны, при численном решении методом граничных элементов, показано на рис. 4. Полученные результаты свидетельствуют о полном качественном и удовлетворительном количественном совпадении расчетных и экспериментальных исследований. Погрешность в определении площадок контакта и максимальных контактных давлений не превышает 10 %.

В подтверждении этого можно привести диаграмму, отражающую зависимости значений максимальных контактных давлений от размера пятна контакта для разной локальной податливости промежуточного слоя (рис. 5).

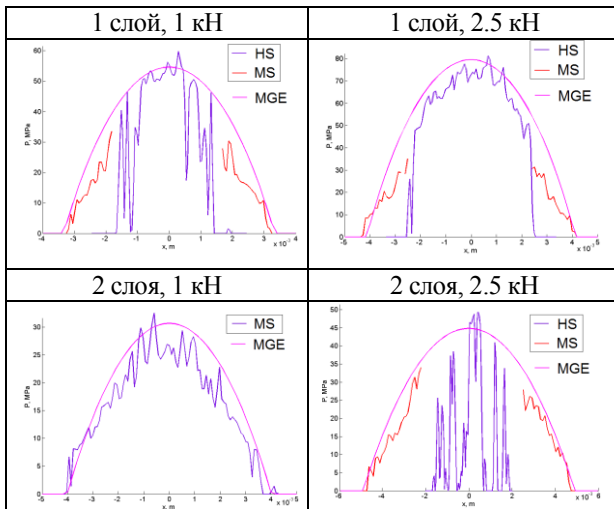


Рис. 4 – Сравнение распределений контактных давлений, полученных экспериментально численным методом граничных элементов (ВЕМ)

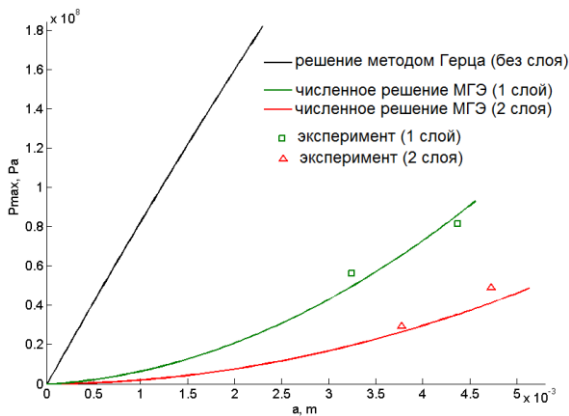


Рис. 5 – Сопоставление полученных численно кривых зависимости максимальных контактных давлений от размера пятна контакта для разной величины локальной податливости с результатами экспериментальных измерений

### Выводы

Для исследования контактного взаимодействия шарового поршня с плоскостью с учетом податливого слоя применена и усовершенствована технология контактных отпечатков с использованием чувствительных к давлению пленок фирмы Fujifilm. Проведенные исследования показали качественное и количественное соответствие результатов, полученных методом граничных элементов и установленных экспериментально. Численно установлено и подтверждено в ряде экспериментов, что при увеличении локальной податливости промежуточного слоя распределения контактных давлений сглаживаются, их максимальные значения снижаются, а пятно контакта растет. Анализ показывает, что погрешность численного моделирования контактного взаимодействия

сложнопрофильных тел с учетом податливости не превышает 10 %.

Таким образом, описанные в работе экспериментальные исследования подтверждают адекватность предложенного ранее в работах [9, 11], метода решения контактных задач, реализующего вариант метода граничных элементов, достоверность и точность численных моделей, а также получаемых с их помощью зависимостей распределений контактных давлений и площадок контакта при учете и варьировании локальной податливости поверхностного слоя сопрягаемых сложнопрофильных тел.

### Список литературы

- 1 **Hertz, H.** Über die Berührung fester elastischer Körper / **H. Hertz** // *J. Reine Angew.* – 1881. – Vol. 92. – P. 156-171.
- 2 **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / **К. Джонсон** // *М.: Мир.* – 1989. – 509 с.
- 3 **Стрэнг, Э.** Теория метода конечных элементов / **Э. Стрэнг, Дж. Фикс** // *М.: Мир.* – 1977. – 349 с.
- 4 **Норри, Д.** Введение в метод конечных элементов / **Д. Норри, Ж. Фриз** // *М.: Мир.* – 1981. – 304 с.
- 5 **Vollebregt, E. A. H.** Use of “CONTACT” in multi-body vehicle dynamics and profile wear simulation: Initial results // **E. A. H. Vollebregt, C. Weidemann, A. Kienberger** // *Proceedings of the 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks.* – 2011. – doi:10.1177/0954409716631009.
- 6 **Vollebregt, E. A. H.** Refinement of Kalker’s rolling contact model ollebregt. In: Bracciali editor // **E. A. H. Vollebregt** // *Proceedings of the 8th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems.* – 2009. – P. 149-156.
- 7 **Прокопишин, І. І.** Числове дослідження задач про контакт трьох пружних тіл методами декомпозиції області / **І. І. Прокопишин, І. І. Дияк, Р. М. Мартиняк** // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 2013. – 49, № 1. – С. 46-55.
- 8 **Ciavarella, M.** On the elastic contact of rough surfaces: Numerical experiments and comparisons with recent theories / **M. Ciavarella, C. Murolo, G. Demelio** // *Wear.* – 2006. Vol. 261. – 1102-1113 p. – doi:10.1016/j.wear.2006.02.001.
- 9 **Skripchenko, N.** Numerical tools for analysis of complex-shaped bodies in mechanical contact / **M. A. Tkachuk, N. Skripchenko, A. Grabovskiy, M. M. Tkachuk** // *Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015).* – *Slovak University of Technology Bratislava.* – 2015. – P. 393-398.
- 10 **Winkler, E.** Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit mit besonderer Rücksicht, etc. / **E. Winkler** // *Verlag von H. Dominicus.* – 1867. – Vol. 1. – 388 p.
- 11 **Скрипченко, Н. Б.** Экспериментальное исследование контактного взаимодействия сложнопрофильных шероховатых тел с учетом податливости / **Н. Б. Скрипченко, Н. Н. Ткачук, А. А. Атрошенко, Н. А. Ткачук** // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* – *Харків: НТУ «ХПІ».* – 2015. – № 34. – С. 124-130.

**Bibliography (transliterated)**

- 1 **Hertz, H.** Über die Berührung fester elastischer Körper. *J. Reine Angew.*, 1881, **92**, 156-171.
- 2 **Dzhonson, K.** Mehanika kontaktного vzaimodeystviya [Mechanics of contact interaction]. *Moskow: Mir*, 1989, 509 p.
- 3 **Streng, E., Fiks, Dg.** Teoriya metoda konechnykh elementov [The theory of finite elements method], *Moskow: Mir*, 1977, 349 p.
- 4 **Norri, D., Friz, Zh.** Vvedenie v metod konechnykh elementov [Introduction to finite elements method]. *Moskow: Mir*, 1981, 304 p.
- 5 **Vollebregt, E. A. H., Weidemann, C., Kienberger, A.** Use of "CONTACT" in multi-body vehicle dynamics and profile wear simulation: Initial results. *Proceedings of the 22nd International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 2011, doi:10.1177/09544097116631009.
- 6 **Vollebregt, E. A. H.** Refinement of Kalker's rolling contact model ollebregt. In: Bracciali editor. *Proceedings of the 8th international conference on contact mechanics and wear of rail/wheel systems*, 2009, 149-156.
- 7 **Prokopishin, I. I., Diyak, I. I., Martinyak, R. M.** Chislove doslidzhennya zadach pro kontakt troh pruzhnykh til metodami dekompozitsii oblasti [Numerical investigation of problems on the contact of elastic bodies of three domain decomposition]. *Fiz.-him. mehanika materialiv [Physical Chemical Mechanics of Materials]*, 2013, **49**(1), 46-55.
- 8 **Ciavarella, M., Murolo, C., Demelio, G.** On the elastic contact of rough surfaces: Numerical experiments and comparisons with recent theories. *Wear*, 2006, **261**, 1102-1113, doi:10.1016/j.wear.2006.02.001.
- 9 **Tkachuk, M. A., Skripchenko, N., Grabovskiy, A., Tkachuk, M. M.** Numerical tools for analysis of complex-shaped bodies in mechanical contact. *Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015)*, Slovak University of Technology Bratislava, 2015, 393-398.
- 10 **Winkler, E.** Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit mit besonderer Rücksicht, etc. *Verlag von H. Dominicus*, 1867, **1**, 388 p.
- 11 **Skripchenko, N. B., Tkachuk, N. N., Atroshenko, A. A., Tkachuk, N. A.** Eksperimentalnoe issledovanie kontaktного vzaimodeystviya slozhnoprofilnykh sherohovatykh tel s uchetom podatlivosti [Experimental study of contact interaction slozhnoprofilnykh rough bodies in view of compliance]. *Visnik Natsionalnogo tehnichnogo universitetu «Kharkivskiy politehniichnyy institut» [Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute']*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015, **34**, 124-130.

**Сведения об авторах (About authors)**

**Скрипченко Наталья Борисовна** – младший научный сотрудник кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; e-mail: negrobova@gmail.com.

**Natalia Skripchenko** – Junior researcher of the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: negrobova@gmail.com.

**Ткачук Николай Николаевич** – к.т.н., Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», докторант кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин; г. Харьков, Украина; e-mail: mikolei@rambler.ru.

**Mykola Tkachuk** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), doctorante of the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: mikolei@rambler.ru.

**Атрошенко Александр Александрович** – младший научный сотрудник кафедры теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; e-mail: atroshenko@tmm-sapr.org.

**Oleksandr Atroshenko** – Junior researcher of the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, National technical university "Kharkiv polytechnic institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: atroshenko@tmm-sapr.org.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Скрипченко, Н. Б.** Расчетно-экспериментальное исследование контакта сложнопровильных тел / **Н. Б. Скрипченко, Н. Н. Ткачук, А. А. Атрошенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 84-88. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.11.

*Please cite this article as:*

**Skripchenko, N., Tkachuk, N., Atroshenko, O.** Numerical and experimental study of contact for bodies of complex shape. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12** (1184), 84-88, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.11.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Скрипченко, Н. Б.** Розрахунково-експериментальне дослідження контакту складнопровільних тіл / **Н. Б. Скрипченко, М. М. Ткачук, О. О. Атрошенко** // *Вісник НТУ «ХПИ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 84-88. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.11.

**АННОТАЦИЯ** У роботі проведено та описано ряд експериментальних досліджень для обґрунтування застосовності розробленого варіанта методу граничних інтегральних рівнянь із застосуванням чутливих до тиску плівок. Порівняння розподілу контактного тиску, який отримано експериментально та при числовому розв'язанні задачі методом граничних елементів, підтвердило повну якість та задовільну кількісну відповідність розрахункових та експериментальних досліджень. Похибка у визначенні площі контакту та максимального контактного тиску не перевищила 10%.

**Ключові слова:** контактна взаємодія, метод граничних елементів, напружено-деформований стан, шорсткість, гідрооб'ємна передача, чутливі до тиску плівки.

*Поступила (received) 08.03.2016*