

УДК 622.002.5:621.8.031.4

В.В. Сухарев, канд. техн. наук, научн. сотр.,
П.В. Левченко, мл.научн.сотр.
(ИГТМ НАН Украины),
Д.В. Белюшин, аспирант
(ГВУЗ «НГУ»)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА МАШИНЫ С ГОРНОЙ МАССОЙ

В.В. Сухарев, канд. техн. наук, научн. сотр.,
П.В. Левченко, мл.научн.сотр.
(ИГТМ НАН України),
Д.В. Белюшин, аспірант
(ДНВЗ «НГУ»)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧОГО ОРГАНА МАШИНИ З ГІРСЬКОЮ МАСОЮ

V.V. Sukharyev, Ph.D. (Tech.), Researcher,
P.V. Levchenko, Junior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine),
D.V. Beliushin, Doctoral Student
(SHEE "NMU")

IDENTIFICATION OF RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDY OF THE SHOCK INTERACTION BETWEEN A MOVABLE OPERATING ELEMENT OF A VIBRATORY MACHINE AND THE ROCKS

Аннотация. Целью данного исследования являлась разработка модели взаимодействия падающей кусковой горной массы с рабочими органами вибромашин для определения рациональных или оптимальных параметров напряженного состояния защищаемой поверхности и деформационных характеристик футеровок.

Предыдущие исследования показали, что основными факторами, оказывающими влияние на защитные свойства футеровки, является её толщина, твердость и сила удара, при этом не учитывалась комплексное воздействие изменения площади резиновой футеровки или модуля объёмного сжатия. С использованием прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics методом наименьших квадратов был проведен регрессионный анализ полученных ранее экспериментальных данных. С высоким уровнем достоверности и адекватности установлены регрессионные зависимости возникающих напряжений в коробе и глубины вдавливания от параметров защитной резиновой футеровки (твёрдость и площадь) и энергии удара, моделирующей падение кусковой горной массы на рабочий орган горных машин. Полученная математическая модель позволяет определять рациональные или оптимальные параметры напряженного состояния защищаемой поверхности и деформационных характеристик футеровок.

Ключевые слова: горная масса, эластичная футеровка, удар, напряжение.

Введение. На сегодняшний день повышение эффективности переработки и обогащения минерального сырья при снижении себестоимости разработки месторождений полезных ископаемых является актуальной проблемой, для решения которой необходим, как индивидуальный, так и комплексный подход к изучению новых методов и способов расчёта составных частей технологического процесса. При этом необходимо учесть, что затраты на покупку нового или ремонт старого оборудования составляют львиную долю финансовых расходов на предприятиях.

Основной причиной выхода из строя эксплуатируемого оборудования, предназначенного для транспортировки и переработки полезных ископаемых (грохотов, вибропитателей, конвейеров, бункеров и т.п.) являются ударные нагрузки от падающих кусков горной массы и абразивный износ их рабочих органов. Для предотвращения преждевременного выхода из строя и повышения срока службы данных машин получило широкое распространение применение эластичных защитных покрытий их рабочих органов (коробов, приёмных площадок). Несмотря на то, что резина имеет на порядок ниже прочностные характеристики, чем защищаемая стальная поверхность, срок её службы довольно часто превышает показатели срока службы металлических поверхностей из легированных сталей. При этом напряжения при ударах по защищенной резиной металлической поверхности рабочих органов машин, как минимум, в 3-10 раз меньше, чем при ударе по незащищенной поверхности. Если выбор толщины футеровок сделан правильно, её разрушение не происходит.

Выполненные теоретические исследования в данной области опираются на основы расчёта колебаний и удара [1-2], а в работе [3] авторами решались вопросы, связанные с расчётами и изготовлением защитных резиновых футеровок, которые показали высокую эффективность в предохранении от ударных нагрузок и износа рабочих поверхностей горных машин.

Экспериментальному изучению ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями посвящена работа [4], в которой были определены доминирующие факторы и их числовые значения в процессе взаимодействия непосредственно в зоне контакта куска падающей горной массы с поверхностью рабочего органа (с защитным слоем либо без него).

Одним из важнейших параметров при выборе футеровки является её толщина, которая должна обеспечивать не только защиту рабочей поверхности горной машины, но и предотвращать от предельных деформаций резины, не допуская её преждевременного износа. В проведенных исследованиях [5] установлено, что на изменение величины деформации резины или глубины вдавливания (z , мм) также влияет энергия удара (E_k , Дж), твёрдость (E_r , ед. по Шору) и толщина резины (h_r , мм). Однако в этой работе не был учтён фактор комплексного влияния изменения площади эластичной футеровки S_r , ведь при решении контактной задачи удара о резиновую футеровку и при расчёте допустимой деформации используется стандартный динамический модуль Юнга, который не учитывает влияние площади футеровки. Решение данной задачи было достаточно хорошо осветлено в последующей работе [6], в ходе которой были установлены зависимости глубины вдавливания, времени удара и напряжения

от энергии удара, твердости и площади резины. При этом определено, что использование эффекта объёмного сжатия позволяет снизить напряжения в защищаемых рабочих поверхностях на 20-25%.

Целью данной работы является разработка модели взаимодействия падающей кусковой горной массы с рабочими органами вибромашин для определения рациональных или оптимальных параметров напряженного состояния защищаемой поверхности и деформационных характеристик футеровок.

При проведении экспериментальных исследований [6] варьировался один из параметров при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволяет провести многофакторный регрессионный анализ (при $h_r = 24$ мм). Общий вид зависимостей напряжения в коробе (σ , МПа) и глубины вдавливания (z , мм) от перечисленных выше факторов рассчитывались на основании выполненных исследований и задавались в следующей форме:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j,$$

где Y – функция отклика; a_0 – свободный член уравнения; $a_i \cdot x_i$, $a_{ii} \cdot x_i^2$ – линейные и квадратичные слагаемые в виде произведений коэффициентов регрессии a_i на факторы x_i ; $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ – слагаемые парных произведений факторов; n – число переменных факторов. Расчёт данной модели методом наименьших квадратов производился средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Шаговый отбор”. При работе данного алгоритма независимые переменные (x_i), которые имеют наибольшие коэффициенты частичной корреляции с зависимой переменной (Y), пошагово включаются в регрессионное уравнение [7]. После каждого шага оценивалась адекватность полученной модели F (статистика Фишера) и коэффициент детерминации R^2 , а факторы, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказывались незначимыми ($t_{\text{tabl}} \geq t_{ai}$), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак [8]. По знаку коэффициента регрессии a_i можно определить влияния соответствующего фактора x_i на функцию: положительный знак свидетельствует о возрастании функции при увеличении фактора x_i , отрицательный – о снижении, а абсолютное значение коэффициента a_i показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

Таким образом, в результате расчёта получена обобщённая регрессионная зависимость возникающих в коробе машины напряжений от параметров резиновой футеровки (твёрдость E_r , площадь S_r) и энергии удара E_k в следующем виде (объём выборки составил 70 измерений функции отклика):

$$\sigma = -7,379 + 0,209 \cdot E_r - 0,004 \cdot E_k^2 + 0,009 \cdot E_r \cdot E_k + 0,0004 \cdot E_r \cdot S_r + 0,0006 \cdot E_k \cdot S_r$$

Данная регрессионная зависимость с высоким уровнем адекватности описывает полученные экспериментальные данные, что подтверждает расчётная статистика Фишера $F = 492,2$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,936$ показывает, что изменчивость функции σ на 93,6 % объясняется влиянием учтённых в модели факторов.

На рис. 1 представлены графики зависимости напряжения в коробе σ от энергии удара E_k при фиксированной твёрдости резины по Шору ($E_r = 56$ ед.) и различных вариациях её площади S_r . В исследуемом диапазоне значений переменной E_k функция σ квадратично возрастает. При увеличении силы удара происходит увеличение напряжения, что объясняется уменьшением демпфирующих свойств и ростом жесткости резины вследствие увеличения скорости ударного импульса.

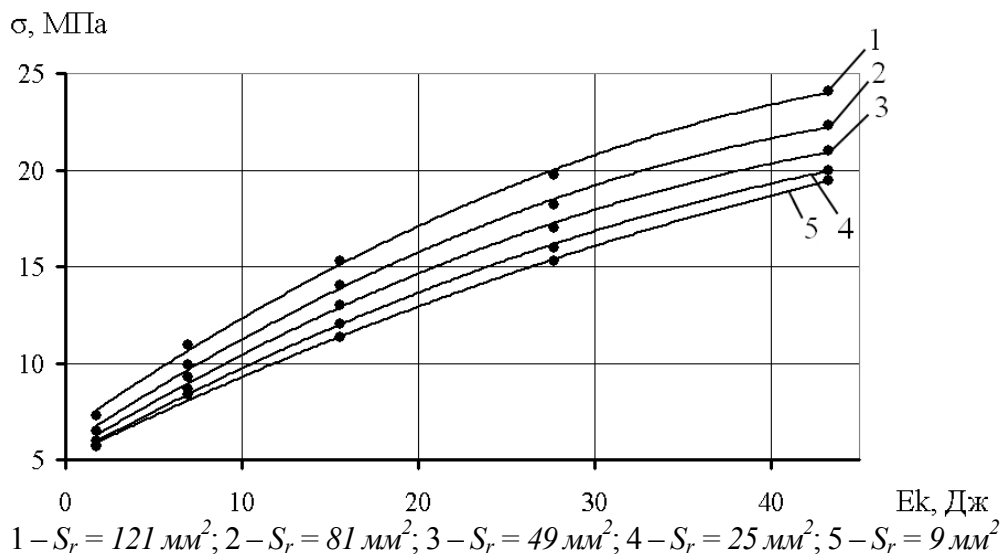


Рисунок 1 – Зависимость напряжения в коробе σ от энергии удара E_k при разной площади резинового слоя S_r

Расчётные графики регрессионной зависимости напряжения в коробе от твёрдости резины при разной её площади и фиксированной энергии удара ($E_k = 15,6$ Дж) показаны на рис. 2. Для сравнения достоверности расчётных и экспериментальных значений на графики нанесены точки, полученные опытным путём. Зависимость имеет линейный характер, при увеличении твердости резины напряжение увеличивается, что объясняется снижением упруго-вязких свойств эластомерных материалов.

На рис. 3 представлены расчётные графики зависимости напряжения в коробе от площади резинового слоя (твёрдость резины $E_r = const = 56$ ед.) при варьировании энергии удара о футеровку. Зависимость обладает линейным характером – при увеличении площади резины напряжения в рабочей поверхности увеличиваются, тем самым подтверждается отрицательное влияние эффекта объёмного сжатия на демпфирующие свойства резины, что приводит к увеличению жесткостных характеристик эластичной футеровки и снижению её защитных свойств.

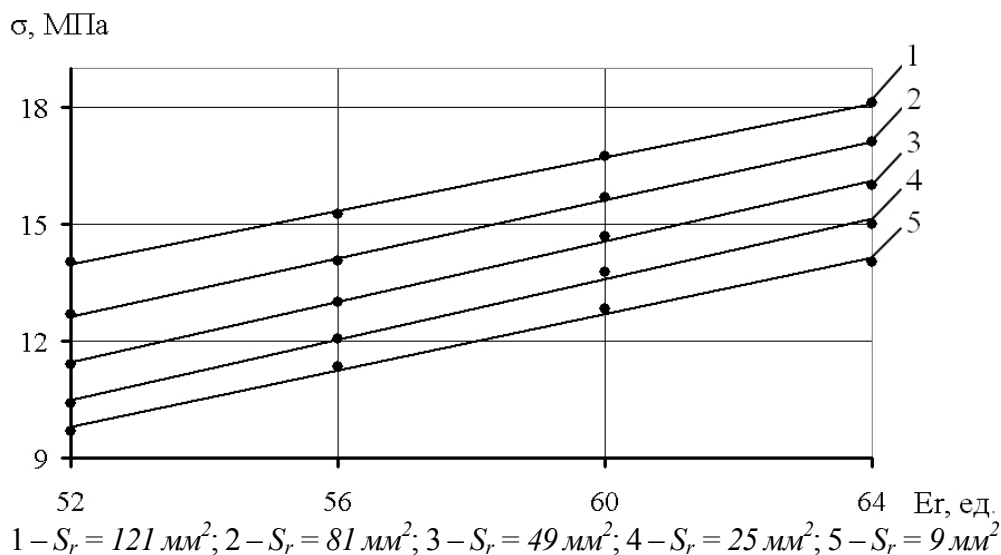


Рисунок 2 – Зависимость напряжения в коробе σ от твёрдости резины E_r при разной площади резинового слоя S_r

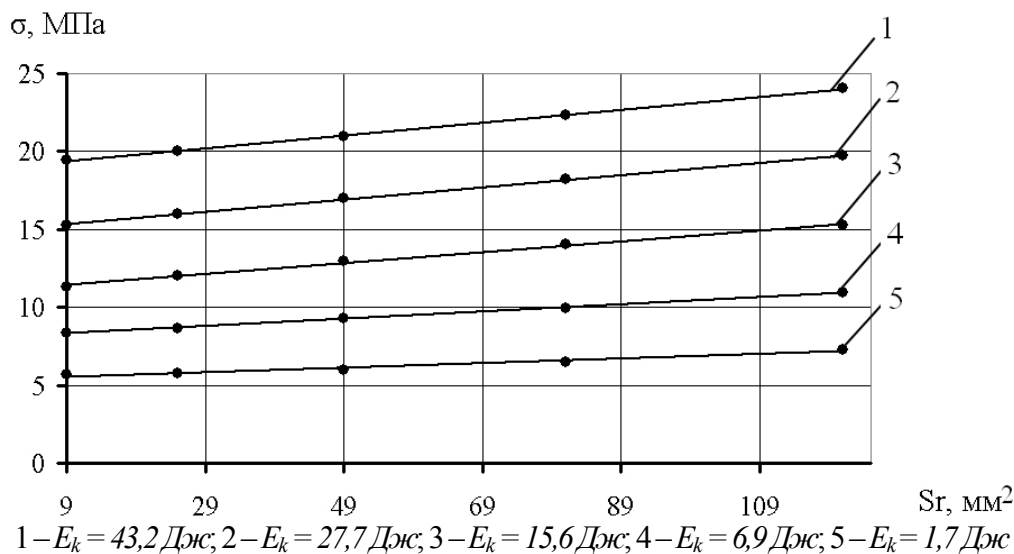


Рисунок 3 – Зависимость напряжения в коробе σ от площади резинового слоя S_r при разной энергии удара E_k

Аналогичным образом установлена многофакторная регрессионная зависимость глубины вдавливания z от параметров резины и энергии удара (выборка составила 70 измерения):

$$z = 28,747 - 0,674 \cdot E_r - 0,047 \cdot S_r + 0,004 \cdot E_r^2 - 0,001 \cdot E_k^2 + 0,0001 \cdot S_r^2 + 0,002 \cdot E_r \cdot E_k + 0,0004 \cdot E_r \cdot S_r - 0,0001 \cdot E_k \cdot S_r$$

Статистические характеристики этой регрессионной зависимости: коэффициент детерминации $R^2 = 0,924$ и статистика Фишера $F = 249,9$ подтверждают достоверность и адекватность модели экспериментальным данным. Графики расчётной зависимости глубины вдавливания от энергии удара и параметров резины представлены на рис. 4-6.

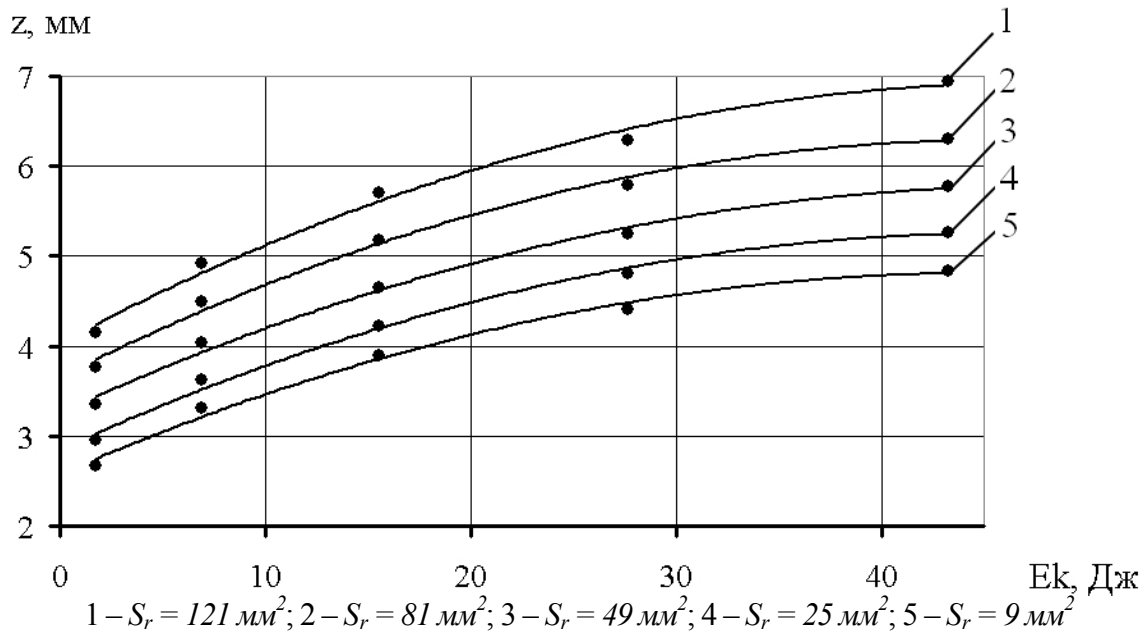


Рисунок 4 – Зависимость глубины вдавливания z от энергии удара E_k при разной площади резинового слоя S_r

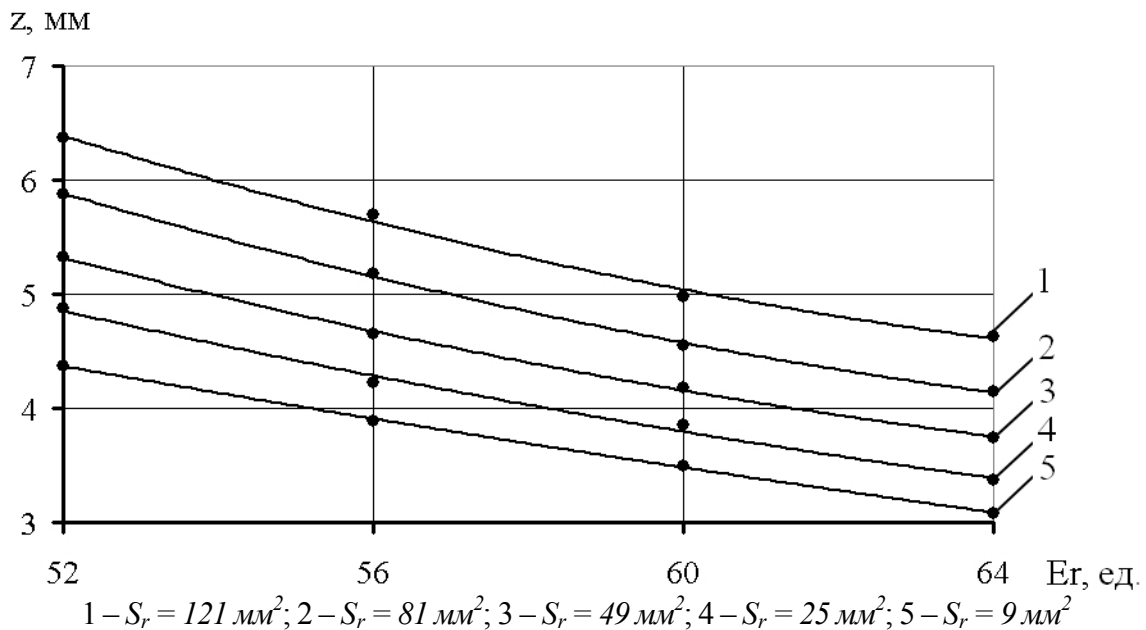


Рисунок 5 – Зависимость глубины вдавливания z от твёрдости резины E_r при разной площади резинового слоя S_r

Влияние и характер зависимостей глубины вдавливания z от площади резинового слоя S_r при разной энергии удара E_k представлен на рис. 6. Зависимость носит квадратичный характер. При увеличении площади резины по отношению к постоянной площади индентора происходит уменьшение деформации резины, что объясняется проявлением эффекта объёмного сжатия. Данный эффект говорит о том, что наличие резины вне границы площади отпечатка индентора приводит к увеличению жёсткостных характеристик эластичной футеровки.

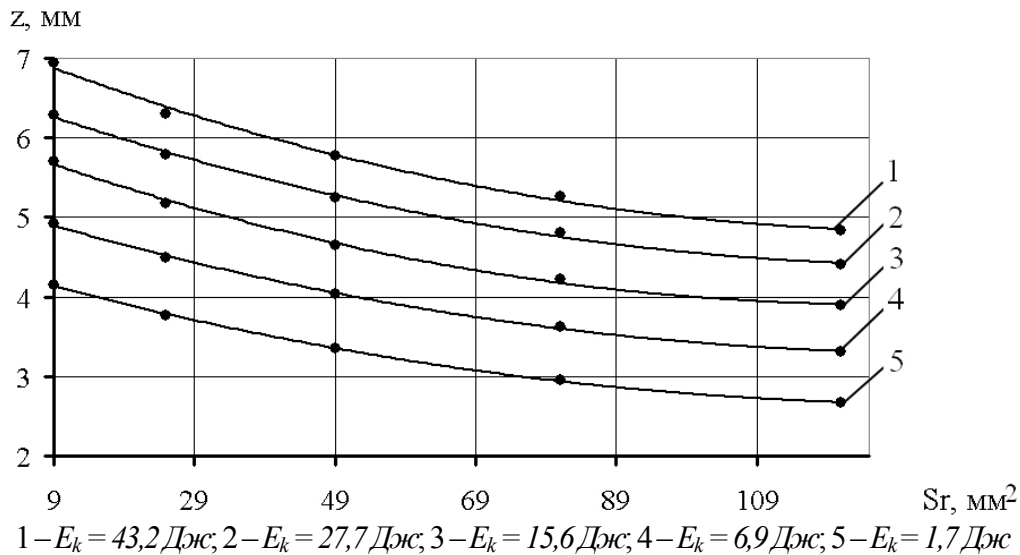


Рисунок 6 – Залежність глибини вдавлювання z від площі резинового слоя S_r при різній енергії удара E_k

Выводы.

Виконані авторами експериментальні та теоретичні дослідження показали необхідність використання поправочного коефіцієнта при розрахунках модуля пружності полімерних матеріалів, так як останній, в наші часи, не враховує впливу ефекта об'ємного стиснення при зміні площі еластомера, і застосовуються значення даного модуля, отримані лише для одиничного участка. При цьому, в залежності від твердості гуми, поправочний коефіцієнт знаходиться в межах 20-25 %.

В результаті проведених досліджень встановлена регресійна залежність виникаючих напружень в коробі та глибини вдавлювання від параметрів захисної гумової футеровки (твердість та площа) та енергії удара, що моделює падіння кускової гірної маси на робочий орган гірних машин.

Отримана математична модель взаємодії падаючої кускової гірної маси з робочими органами гірних машин дозволяє визначати раціональні або оптимальні параметри напруженого стану захищеної поверхні та деформаційних характеристик футеровки. Прикладом оптимізаційної задачі може послужити мінімізація функції $\sigma = f(E_r, S_r, E_k) \rightarrow \min$ при накладуваних обмеженнях по деформації еластичної футеровки $z \leq 20$ %.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гольдсмит В. Удар. Теорія та фізичні властивості соударяємих тіл / В. Гольдсмит – М.: Госстройиздат, 1965. – 448 с.
2. Пановко, Я.Г. Основи прикладної теорії коливань та удара / Я.Г. Пановко – Л.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
3. Потураєв, В.Н. Резина в гірному ділі / В.Н. Потураєв, В.И. Дырда, В.П. Надутый. – М.: Недра, 1974. – 150 с.
4. Надутый, В.П. Дослідження напруженого стану робочого органу вібраційної машини з захисним шаром при ударних навантаженнях / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – Вип. 4(68). – С. 71-75.

5. Надутый, В.П. Определение напряженного состояния вибропитателя для выпуска руды из блока при ударных нагрузках / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск. – 2013. – № 1. – С. 60-62.
6. Сухарев, В.В. Анализ факторов, влияющих на механизм ударного взаимодействия эластичной футеровки с горной массы / В.В. Сухарев, П.В. Левченко, Д.В. Белюшин // *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць ІГТМ НАН України*. – Дніпропетровськ. – 2013. – Вип. 111. – С. 160-170.
7. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. / Бююль А., Цефель П. – СПб.: ООО «ДиаСофт ЮП», 2005. – 608 с.
8. Грушко, И.М. Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. / И.М. Грушко, В.М. Сиденко // Харьков: Вища школа, 1983. – 224 с.

REFERENCES

1. Goldsmit, V. (1965), *Udar. Teoriya i fizicheskiye svoystva soudariayemykh tel* [The theory and the physical properties of the colliding bodies], Gosstroyizdat, Moscow, SU.
2. Panovko, Ya.G. (1976), *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara* [Fundamentals of applied theory of vibrations and impact], Mashinostroenie, Lvov, SU.
3. Poturayev, V.N., Dyrda, V.I. and Naduty, V.P. (1974), *Rezina v gornom dele* [Rubber is on mountain business], Nedra, Moscow, SU.
4. Nadutyu, V.P., Sukharyev, V.V. and Beliushin, D.V. (2012), "Research of the tense state of working organ of oscillation machine with a protective layer at the shock loading", *Vibratsi v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh*, no. 4, pp. 71-75.
5. Nadutyu, V.P., Sukharyev, V.V. and Beliushin, D.V. (2013), "Definition of an intense status Vibrating feeder for release of ore from the block at shock loadings", *Metalurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no. 1, pp. 60-62 .
6. Sukharyev, V.V., Levchenko, P.V. and Beliushin, D.V. (2013), "Analysis of factors affecting on the mechanism of impact interection of the elastic lining of mountain weight", *Geo-Technical Mechanics*, no. 111, pp. 160-170.
7. Buul, A. and Cefel, P. (2005), *SPSS: iskustvo obrabotki informacii. Analiz statisticheskikh dannykh i vostanovlenie skrytykh zakonomernostey* [SPSS: Art of processing of the information. The analysis of the statistical data and restoration of the latent laws], Translated by Kozlov, S.N., Diasoft, St.-Petersburg, Russia.
8. Grushko, I.M. and Sidenko, V.M. (1983), *Osnovy nauchnykh issledovaniy* [Bases of scientific researches], Vyshcha Shkola, Kharkov, Ukraine.

Об авторах

Сухарев Виталий Витальевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, agnivik@ukr.net.

Левченко Павел Владимирович, младший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, prodvnutiy2005@ukr.net.

Белюшин Дмитрий Владимирович, аспирант, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепропетровск, Украина.

About the author

Sukharyev Vitaliy Vitalievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, agnivik@ukr.net.

Levchenko Pavel Vladimirovich, Junior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, prodvnutiy2005@ukr.net.

Beliushin Dmitriy Vladimirovich, Doctoral Student of the State Higher Educational Establishment is the "National Mining University", Zaporozhye iron-ore combine, designer, Dnepropetrovsk, Ukraine.

Анотація. Метою даного дослідження була розробка моделі взаємодії падаючої кускової

гірської маси з робочими органами вібр машин для визначення раціональних чи оптимальних параметрів напруженого стану захищеної поверхні та деформаційних характеристик футерівок.

Попередні дослідження показали, що основними чинниками, що впливають на захисні властивості футерування, є її товщина, твердість і сила удару, при цьому не враховувалася комплексний вплив зміни площі гумової футеровки або модуля об'ємного стиснення. З використанням прикладного пакета обробки статистичних даних SPSS Statistics методом найменших квадратів був проведений регресійний аналіз отриманих раніше експериментальних даних. З високим рівнем вірогідності й адекватності встановлені регресійні залежності виникаючих напруг у коробі та глибини вдавнення від параметрів захисної гумової футерівки (твердість і площа) і енергії удару, що моделює падіння кускової гірської маси на робочий орган гірських машин. Отримана математична модель дозволяє визначати раціональні чи оптимальні параметри напруженого стану захищеної поверхні та деформаційних характеристик футерівок.

Ключові слова: гірська маса, еластична футерівка, удар, напруга.

Abstract. Purpose of this study was to design a model of interaction between falling rock lumps and movable operating elements of a vibratory machine and to determine rational and optimal factors for the stress state of the surface under protection or deformation of the lining.

The previous studies showed that the main factors which influenced protective properties of the lining were the lining thickness and hardness and impact force, however, they did not take into account a combined effect of changes in the rubber lining area or dilatation modulus. The experimental data obtained previously were analyzed in regression with the help of an applied package for processing statistic data SPSS Statistics and by least-squares method. Regressive dependencies between the stresses occurred in the box and indentation depth and parameters of the protective rubber lining (its firmness and area) and impact energy were established with high level of confidence and adequacy of simulating lumps falling on the movable operating elements in the mining machines. The mathematical model can specify rational and optimal factors for the stress state of the surface under protection or deformation of the lining.

Keywords: rocks, elastic lining, impact, stress.

Стаття постуила в редакцію 15.02.2014

Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук В.П. Надутым

V.P. Naduty, D.Sc. (Tech.), Professor,
V.F. Yagnyukov, Ph.D. (Tech.), Researcher,
I.V. Yagnyukova, Doctoral Student
(IGTM NAS of Ukraine)

**ABOUT SOME SPECIFIC MOTIONS OF MOVABLE OPERATING
ELEMENTS IN THE VIBROIMPACT ROLL CLASSIFIER**

В.П. Надутый, д-р техн. наук, професор,
В.Ф. Ягнюков, канд. наук, наук. співр.,
І.В. Ягнюкова, аспірант
(ІГТМ НАН України)

**ПРО ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ РУХУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВАЛКОВОГО
ВІБРОУДАРНОГО КЛАСИФІКАТОРА**

В.П. Надутый, д-р наук, професор,
В.Ф. Ягнюков, канд. наук, науч. сотр.,
И.В. Ягнюкова, аспирант
(ИГТМ НАН Украины)

**О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ДВИЖЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ВАЛКОВОГО ВИБРОУДАРНОГО
КЛАССИФИКАТОРА**

Annotation. Purpose of this study was to obtain more information on motion of movable operating elements in the vibroimpact classifier, and final purpose was to improve efficiency and productivity of the mineral processing. A considerable interest presents a kinematic scheme in which a vibrating roller made in the form of a circular cylinder rolls on the inner surface of a spring-loaded square tube all points of which move circularly under the action of unbalanced vibratory drive. The studies focused on creating an analytical function, which could describe a trajectory of the roller's mass center as close to its original as possible. Three variants of solving this problem are described. In the first variant, the analytical construction of the function is based on the integer function in a cylindrical coordinate system, in the second - on the inverse trigonometric functions such as $\arcsin(\sin \varphi)$ and $\arccos(\cos \varphi)$ in the Cartesian coordinate system, and in the third variant – on the sum of two trigonometric functions, one of which is an exponential. The obtained results can be used for qualitative and quantitative analysis of dynamics of the movable operating elements of vibroimpact roll classifier as they can reflect nay displacements, velocities and accelerations of the pendulum points. All of these three variants are also applicable for visualization and animation of the pendulum dynamics in any user-friendly graphical environment.

Keywords: roll vibroimpact classifier, non-linear pendulum, regular polygon in polar coordinate system, vibrating rolling, continuous motion.

Considering the problem of motion stability of executive elements of vibrating roller classifier as a pendulum with hetero-parametric excitation [1], it was concluded that the motion of a pendulum with parametric excitation is stable. This problem was