

**II. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА**

Надуть В. П.
Сухарев В. В.

*Институт
геотехнической
механики
им. Н. С. Полякова
НАН Украины*

Белюшин Д. В.

*Государственное
высшее учебное
заведение
«Национальный горный
университет»*

Naduty V. P.
Sukharyev V. V.

*Institute of Geotechnical
Mechanics of NAS of
Ukraine*

Beljushin D. V.

*State Higher Education
Institution «National
Mining University»*

УДК 622.002.5:621.8.031.4

АППРОКСИМАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРНОЙ МАССЫ С РАБОЧИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВИБРОМАШИН

Аннотация. В статье выполнен математический регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований ударного взаимодействия кусковой горной массы с футерованными рабочими поверхностями вибромашин для определения напряжений в коробе рабочего органа и глубины лунки в зависимости от энергии удара и параметров резиновой футеровки, что позволяет выполнять прочностной расчет конструкции машин и производить выбор футеровки.

Ключевые слова: горная масса, удар, резиновая футеровка, напряжение, глубина лунки.

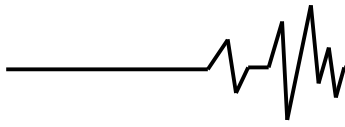
Постановка проблемы. При добыче и переработке горной массы вибромашин (грохоты, питатели) в пунктах загрузки и перегрузки подвергаются значительным динамическим нагрузкам и интенсивному абразивному износу от падающих кусков горной массы. Вследствие этого исследование процессов, которые приводят к разрушению конструкций вибромашин, а также разработка рекомендаций по выбору параметров защиты рабочих поверхностей от ударов является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования в данной области опираются на научные основы расчета колебаний и удара [1-3], также посвящены решению вопросов, связанных с расчетами и изготовлением защитных резиновых футеровок, которые показали высокую эффективность в предохранении от ударных нагрузок и износа рабочих поверхностей вибромашин [4]. Экспериментальному изучению ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями

посвящена работа, выполненная ранее авторами статьи [5]. В данной статье 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), а также описана методика проведения эксперимента.

Нерешенные части проблемы. Несмотря на широкое рассмотрение проблемы ударного взаимодействия, остаются неучтенными особенности использования защитных футеровок, что возмещается повышением запасов прочности за счет увеличения металлоемкости оборудования, а также отсутствуют математические рекомендации по расчету напряжений, возникающих в конструкциях горных машин при изменении параметров резиновых футеровок.

Целью исследования является определение напряжений в коробе рабочего органа и их характера в зависимости от энергии удара и параметров резиновой



футеровки путем математического анализа результатов экспериментальных исследований ударного взаимодействия кусковой горной массы с футерованными рабочими поверхностями вибромашин.

Основные результаты исследования. Обобщенные регрессионные зависимости напряжения в коробе рассчитывались на основании выполненных исследований в следующем виде:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \quad (1)$$

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 [6]. 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 ($t_{\text{табл}} \geq t_{ai}$), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак [7]. По σ , МПа

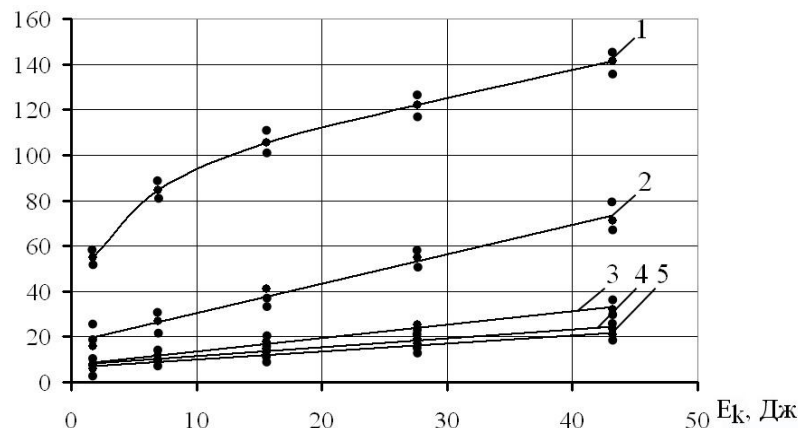


Рис. 1. Зависимость напряжения в коробе σ от энергии удара E_k при разной толщине резинового слоя h_r : 1 – без футеровки; 2 – $h_r = 6$ мм; 3 – $h_r = 12$ мм; 4 – $h_r = 18$ мм; 5 – $h_r = 24$ мм

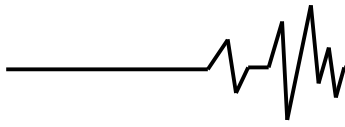
знаку коэффициента регрессии a_i можно определить влияния соответствующего фактора x_i на функцию: положительный знак свидетельствует о возрастании функции при увеличении фактора x_i , отрицательный – о снижении, а абсолютное значение коэффициента a_i показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

Расчёт обобщенной регрессионной зависимости напряжения в коробе, футерованного резиной, производился на основании 62 экспериментальных значений. В результате получена следующая зависимость:

$$\sigma = 200,585 - 5,119 \cdot E_r + 1,755 \cdot E_k - 4,912 \cdot h_r + 0,041 \cdot E_r^2 - 0,007 \cdot h_r^2 - 0,051 \cdot E_k \cdot h_r \quad (2)$$

где E_r – твёрдость резины по Шору; h_r – толщина резины, мм; E_k – энергия удара, Дж.

Данная регрессионная зависимость с высоким уровнем адекватности описывает полученные экспериментальные данные, что подтверждает расчётная статистика Фишера $F = 202,87$. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,981$ показывает, что изменчивость функции σ на 98,1 % 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 ($E_r = 56$ единиц) и различных вариациях её толщины h_r . Кривая 1 отображает возникающее напряжённое состояние рабочего органа машины без футеровки, защита короба эластомерным материалом позволяет в 3-5 раз снизить напряжение в металлоконструкции.



Расчётные графики регрессионной зависимости напряжения в коробе от твёрдости резины при разной её толщине 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.

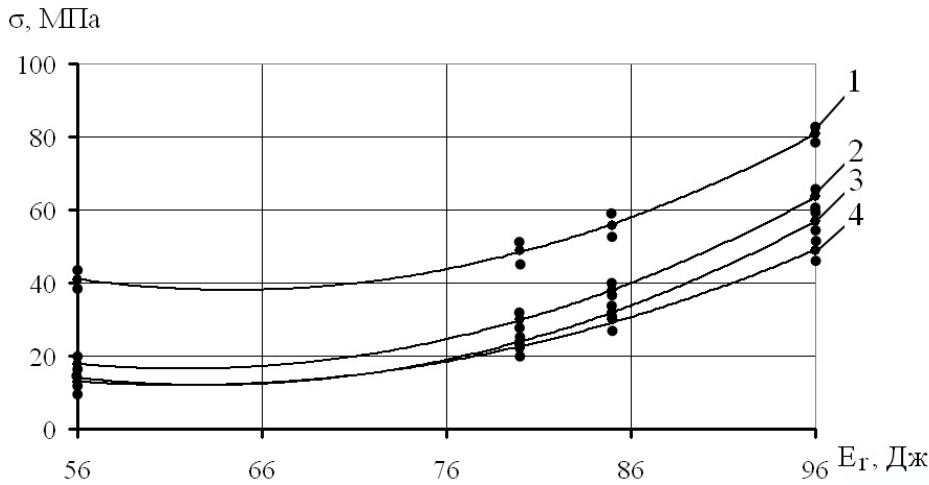


Рис. 2. Зависимость напряжения в коробе σ от твёрдости резины E_r при разной толщине резинового слоя h_r : 1 – $h_r = 6$ мм; 2 – $h_r = 12$ мм; 3 – $h_r = 18$ мм; 4 – $h_r = 24$ мм

На рис. 3 представлены расчётные графики зависимости напряжения в коробе от толщины резинового слоя (твёрдость резины

$E_r = 56$ – const) при варьировании энергии удара о футеровку.

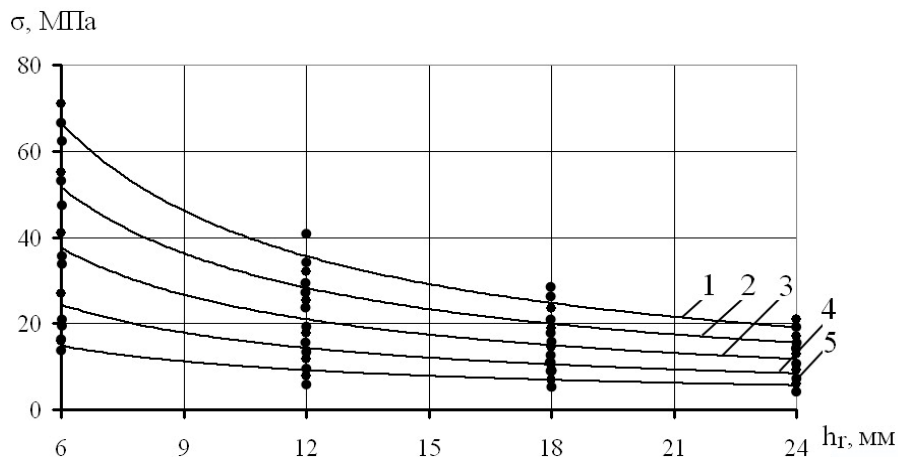


Рис. 3. Зависимость напряжения в коробе σ от толщины резинового слоя h_r при разной энергии удара E_k : 1 – $E_k = 43,2$ Дж; 2 – $E_k = 27,7$ Дж; 3 – $E_k = 15,6$ Дж; 4 – $E_k = 6,9$ Дж; 5 – $E_k = 1,7$ Дж

Аналогичным образом установлена регрессионная зависимость глубины лунки z от параметров резины и энергии удара (выборка составила 62 измерения):

$$z = 7,066 - 0,145 \cdot E_r + 0,035 \cdot E_k + 0,275 \cdot h_r + 0,00074 \cdot E_r^2 + 0,00053 \cdot E_k^2 - 0,019 \cdot h_r^2 - 0,0025 \cdot E_r \cdot h_r + 0,0019 \cdot E_k \cdot h_r \quad (3)$$

Статистические характеристики этой регрессионной зависимости: коэффициент детерминации $R^2 = 0,995$ и статистика Фишера $F = 612,3$ подтверждают достоверность и

адекватность модели экспериментальным данным. Графики расчётной зависимости глубины лунки от энергии удара и параметров резины представлены на рис. 4–6.

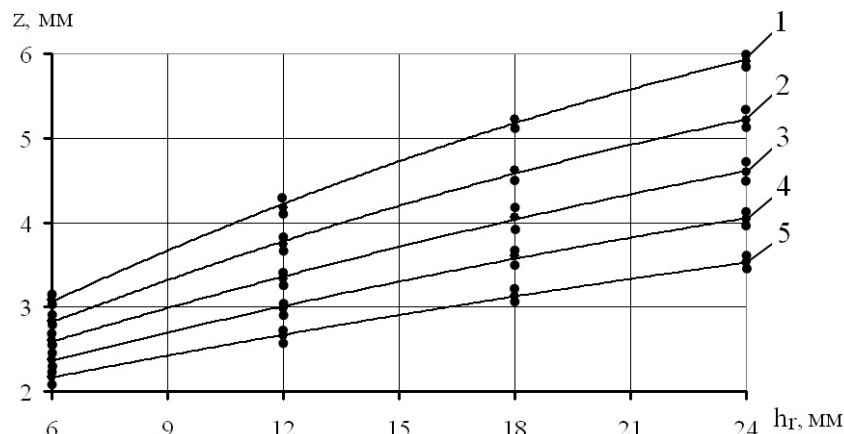
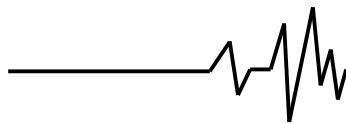


Рис. 4. Зависимость глубины лунки z от толщины резинового слоя h_r при разной энергии удара E_k : 1 – $E_k = 43,2$ Дж; 2 – $E_k = 27,7$ Дж; 3 – $E_k = 15,6$ Дж; 4 – $E_k = 6,9$ Дж; 5 – $E_k = 1,7$ Дж

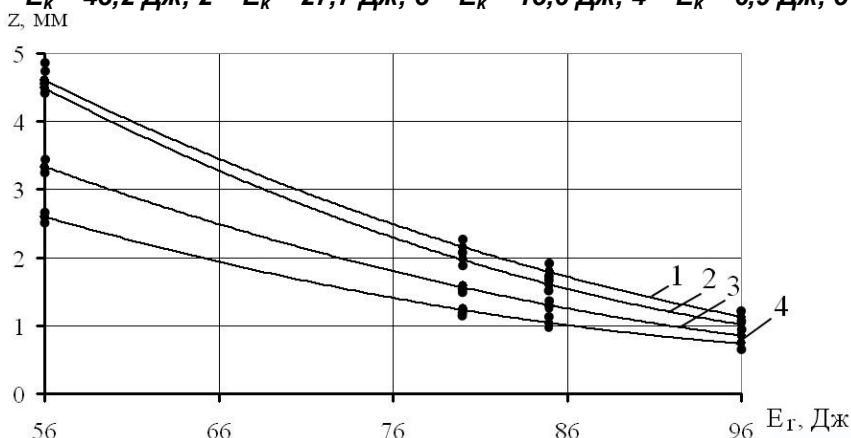


Рис. 5. Зависимость глубины лунки z от твердости резины E_r при разной толщине резинового слоя h_r : 1 – $h_r = 24$ мм; 2 – $h_r = 18$ мм; 3 – $h_r = 12$ мм; 4 – $h_r = 6$ мм

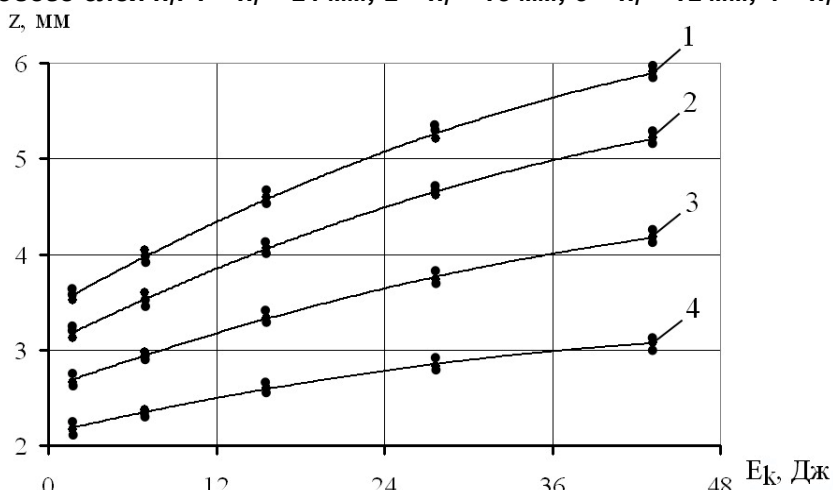


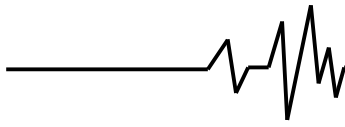
Рис. 6. Зависимость глубины лунки z от энергии удара E_k при разной толщине резинового слоя h_r : 1 – $h_r = 24$ мм; 2 – $h_r = 18$ мм; 3 – $h_r = 12$ мм; 4 – $h_r = 6$ мм

Выводы. Анализируя вышеизложенное, возможно сделать такие выводы:

1. Используя математический регрессионный анализ результатов экспериментальных исследований впервые получены формулы для определения напряжений σ возникающих при ударе в рабочих поверхностях вибромашин с учетом

параметров футеровки, что позволяет выполнять прочностной расчет рабочего органа машины.

2. Установлена регрессионная зависимость глубины лунки z от параметров резины (твердости и толщины) и энергии удара. На основании величины глубины лунки необходимо производить выбор толщины



резинового слоя футеровки, который должен соответствовать параметрам максимально возможного для данных эксплуатационных условий энергии удара и при этом в зоне контакта испытывать деформацию не более 20 % от толщины (линейная зона деформации) во избежание пробоя и разрушения резины.

3. Перспективным направлением исследований в данной области является использование полученных результатов с учетом влияния эффекта объемного сжатия при изменении площади резины, с целью применения поправочного коэффициента в расчетах для корректировки величины модуля упругости резины.

Список использованных источников

1. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит – М.: Госстройиздат, 1965. – 448 с.

2. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар / Н.А. Кильчевский – К.: Наук. думка, 1976. – 320 с.

3. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко – Л.: Машиностроение, 1976. – 240 с.

4. Потураев В.Н. Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах / В.Н. Потураев, В.П. Франчук, В.П. Надутый : Монография // Национальная горная академия Украины. – Днепропетровск. – 2002. – 230 с.

5. Надутый В.П. Определение напряженного состояния вибропитателя для выпуска руды из блока при ударных нагрузках / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белиштин // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – Днепропетровск. – 2013. – № 1. – С. 60-62.

6. Бюль А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. / Бюль А., Цефель П. – СПб.: ООО «ДиаСофт ЮП», 2005. – 608 с.

7. Грушко И.М. Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. / И.М. Грушко, В.М. Сиденко // Харьков: Вища школа, 1983. – 224 с.

Список источников в транслитерации

1. Goldsmit V. Udar. Teoriya i fizicheskiye svoystva soudariayemykh tel / V. Goldsmit – М.: Gosstroyizdat, 1965. – 448 s.

2. Kilchevskiy N.A. Dinamicheskoye kontaktoye szhatiye tverdykh tel. Udar / N.A. Kilchevskiy – К. : Nauk. dumka, 1976. – 320 s.

3. Panovko Ya.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara / Ya.G. Panovko – Л.: Mashinostroenie, 1976. – 240 s.

4. Poturayev V.N. Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologii v energoyemkikh proizvodstvakh / V.N. Poturayev, V.P. Franchuk, V.P. Nadutyuy : Monografiya // Natsionalnaya gornaya akademiya Ukrainy. – Dnepropetrovsk. – 2002. – 230 s.

5. Nadutyuy V.P. Opredeleniye napriazhennogo sostoyaniya vibropitatelya dlia vypuska rudy iz bloka pri udarnykh nagruzkakh / V.P. Nadutyuy, V.V. Sukharev, D.V. Belyushin // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*. – Dnepropetrovsk. – 2013. – № 1. – S. 60-62.

6. Biuyul A. SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonornostey: Per. s nem. / Biuyul A., Tsefel P. – SPb.: ООО «DiaSoft YuP», 2005. – 608 s.

7. Grushko I.M. Osnovy nauchnykh issledovaniy. 3-e izd., pererab. i dop. / I.M. Grushko, V.M. Sidenko // Kharkov: Vishcha shkola, 1983. – 224 s.

АПРОКСИМАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ З РОБОЧИМИ ПОВЕРХНЯМИ ВІБРОМАШИН

Анотація. У статті виконаний математичний регресійний аналіз результатів експериментальних досліджень ударної взаємодії кускової гірської маси з футерованими робочими поверхнями вібромашин для визначення напруг у корбі робочого органа і глибини лунки, залежно від енергії удару й параметрів гумової футеровки, що дозволяє виконувати міцнісні розрахунки конструкції машин і робити вибір футеровки.

Ключові слова: гірська маса, удар, гумова футеровка, напруга, глибина контакту.

APPROXIMATION RESULT EXPERIMENTAL STUDIES OF THE IMPACT INTERACTION OF THE MOUNTAIN WEIGHT WITH WORKERS SURFACE VIBRATORY MACHINE

Annotation. In article is executed mathematical regression analysis result experimental studies of the impact interaction of the lump mountain weight with lining workers surface vibratory machine for determination of the stress in basket worker organ and depths of the hole depending on energy of the impact and parameter rubber lining that allows the strength calculation of machine design and produce the choice an lining.

Key words: mountain weight, impact, rubber lining, stress, depths of the hole.