

зования магистральных трещин и сдвигения образованных породных блоков в полость выработки. Дальнейшие вычисления производятся только с привлечением методов решения задач механики разрушения.

В результате получена модель воздействия на механические характеристики пород горного массива совокупности систем трещин при проведении вычислительного эксперимента при нелинейной постановке задачи в трехмерной расчетной области.

#### Список литературы

1. Бондаренко В.И., Симанович Г.А., Ковалевская И.А., Фомичёв В.В. Влияние характеристик неоднородности тонкослоистого горного массива на результаты вычислительного эксперимента по устойчивости выемочных выработок / Материалы V Междунар. научн.-практ. конф. «Школа подземной разработки». – Днепропетровск: «ЛізуновПрес», 2011. – С. 10-18.
2. Фомичёв В.В. Предпосылки построения расчетных моделей рамно-анкерной крепи с учетом нелинейных характеристик поведения физических сред / Науковий вісник НГУ – 2012. – № 4. – С. 54-58.
3. Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Фомичёв В.В. Тенденции изменения напряженного состояния слабых пород кровли пластовой выработки / Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників-2010». – Днепропетровск: НГУ, 2010. – С. 183-188.
4. Прогноз деформационных характеристик трещиноватых горных пород и массивов / Латышев О. Г., Матвеев А. А., Мартюшов К. С., Еремизин А. Н. // Изв. вузов. Горный журнал. - 2011. № 7. – С. 92-97.
5. Симанович Г.А., Ковалевская И.А., Фомичёв В.В. Критерии механики разрушения углевмещающего массива при моделировании магистральных трещин породных слоев / Матер. VI Междунар. научн.-практ. конф. «Школа подземной разработки». – Днепропетровск: Лізунов-Прес, 2012. – С. 91-100.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Сдвіжковою О.О.  
Надійшла до редакції 21.04.2013*

УДК 622.002.5:621.8.031.4

© В.П. Надутый, П.В. Левченко, Д.В. Белюшин

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА ВИБРОМАШИНЫ ПРИ УДАРНЫХ НАГРУЗКАХ**

Установлена аппроксимирующая результаты экспериментальных исследований регрессионная зависимость напряжения в рабочем органе машины от энергии удара и влияния жесткости упругих опор.

Встановлено апроксимуючу результати експериментальних досліджень регресійну залежність напруги в робочому органі машини від енергії удару і впливу жорсткості пружних опор.

Approximative results of experimental researches regression dependence of effort in a working body of the machine from energy of impact and influence of rigidity of elastic support is established.

В условиях добычи и переработки горной массы широко используются вибропитатели, виброконвейеры, виброгрохоты и т. п., которые в процессе загрузки испытывают значительные ударные нагрузки от падающих кусков горной массы. Рабочие органы перечисленных машин представляют собой прямо-

угольный короб, установленный на упругие опоры. Поэтому часть ударной нагрузки воспринимается опорами и зависит от их суммарной жесткости, а остальная часть приходится на короб.

Целью исследований является определение зависимости напряжений в коробе рабочего органа от энергии удара от падающих кусков горной массы и степени влияния величины жесткости упругих опор на снижение напряжений в короб при ударе.

Поскольку подбор жесткости опор не является случайной величиной и в каждом конкретном случае применения машины подбирается расчетным путем, то определение напряженного состояния короба при ударе определялось в определенном интервале жесткостей. Это связано, например, с тем, что во всех вибромашинах величина жесткости опор влияет на амплитудно-частотную характеристику колебаний короба, а, следовательно, на технологические показатели работы машины.

В процессе исследований рассматривался центральный удар, поскольку для короба это место является самым деформируемым и в первую очередь нуждается в обеспечении необходимой прочности или защиты.

Следует отметить, что экспериментально характер зависимости напряжений в коробе машины при падении кусковой массы и степень влияния упругих опор при этом определена на специальном стенде, и результаты исследований представлены в работе [1], где подробно описана методика эксперимента. В продолжение этих исследований возникла необходимость аппроксимации экспериментальных характеристики для проведения дальнейших расчетов при выборе параметров машины при ее проектировании или модернизации.

Расчетная схема процесса соударения представлена на рис. 1 в виде центрального удара падающего куска массой  $m$  с энергией удара  $F_k$ , определяемой высотой падения при жестком точечном контакте соударения о днище короба. Суммарная жесткость упругих опор  $C$  представлена в виде набора пружин.

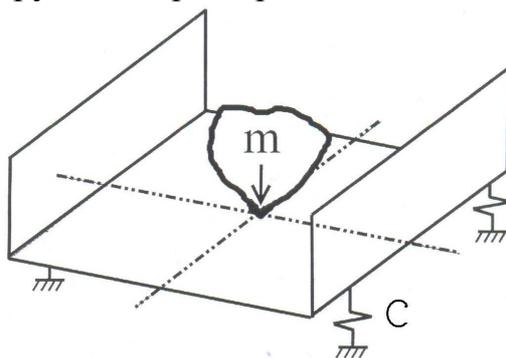


Рис. 1. Расчетная схема рабочего органа при ударной нагрузке

В процессе выбора аппроксимирующей зависимости рассмотрены два варианта – жесткое опирание короба без упругих опор и с упругими опорами различной жесткости. В первом случае зависимость напряжения в коробе от энергии удара аппроксимируется функцией:

$$\sigma = 47,429 + \ln(E_k).$$

На рис. 2 представлены для сравнения экспериментальные значения зависимости напряжения от энергии удара (в виде точек) и расчетная функция (сплошная линия). Достоверность результатов определялась по значениям коэффициента детерминации ( $R^2 = 0,999$ ) и статистики Фишера ( $F = 3260$ ).

Влияние жесткости упругих опор учитывалось обобщенной регрессионной зависимостью на основании выполненных исследований в следующем виде:

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

где  $Y$  – функция отклика;  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_i x_i$ ,  $a_{ii} x_i^2$  – линейные и квадратичные слагаемые в виде произведений коэффициентов регрессии  $a_i$  на факторы  $x_i$ ;  $a_{ij} x_i x_j$  – слагаемые парных произведений факторов;  $n$  – число переменных факторов.

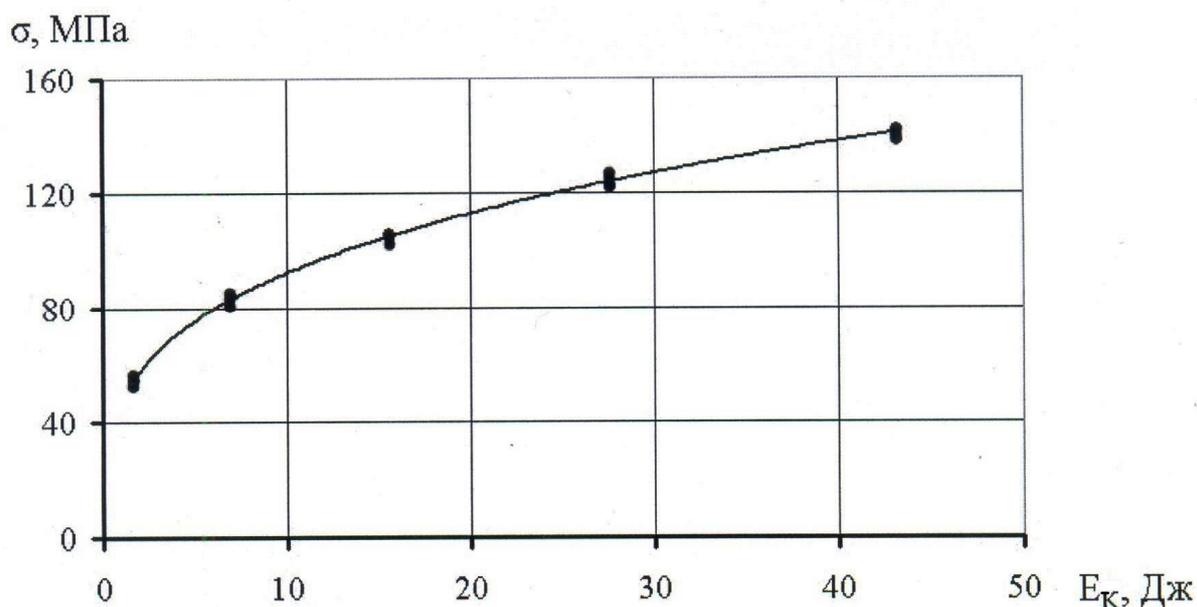


Рис. 2. Зависимость напряжения от энергии удара при жестком опирании короба

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 [2]. После каждого шага оценивалась адекватность полученной модели статистикой Фишера  $F$  и коэффициент детерминации  $R^2$ , а факторы, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказывались незначимыми ( $t_{tabl} \geq t_{a_i}$ ), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на резульативный признак. По знаку коэф-

коэффициента регрессии  $a_i$ , определялось влияние 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 результирующий признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

В результате расчета регрессионная зависимость напряжения в коробе от жесткости упругих опор и энергии удара имеет вид (объем выборки составил 28 измерений)

$$\sigma = 24,919 + 0,011C + 3,887E_K - 0,043E_K^2.$$

Все коэффициенты регрессии значимы, так как статистика Стьюдента  $\left( t_C = 2,1, t_{E_K} = 10,5, t_{E_K^2} = 5,4 \right)$  значительно больше его табличного значения при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  [3]. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,977$ . Адекватность модели подтверждается статистикой Фишера  $F = 152,6$ , которая на порядок больше его критического значения. График данной зависимости в виде трёхмерной поверхности представлен на рис. 3, из которого видно, что напряжение в коробе линейно возрастает при увеличении жёсткости упругих опор и квадратично – при увеличении энергии удара.

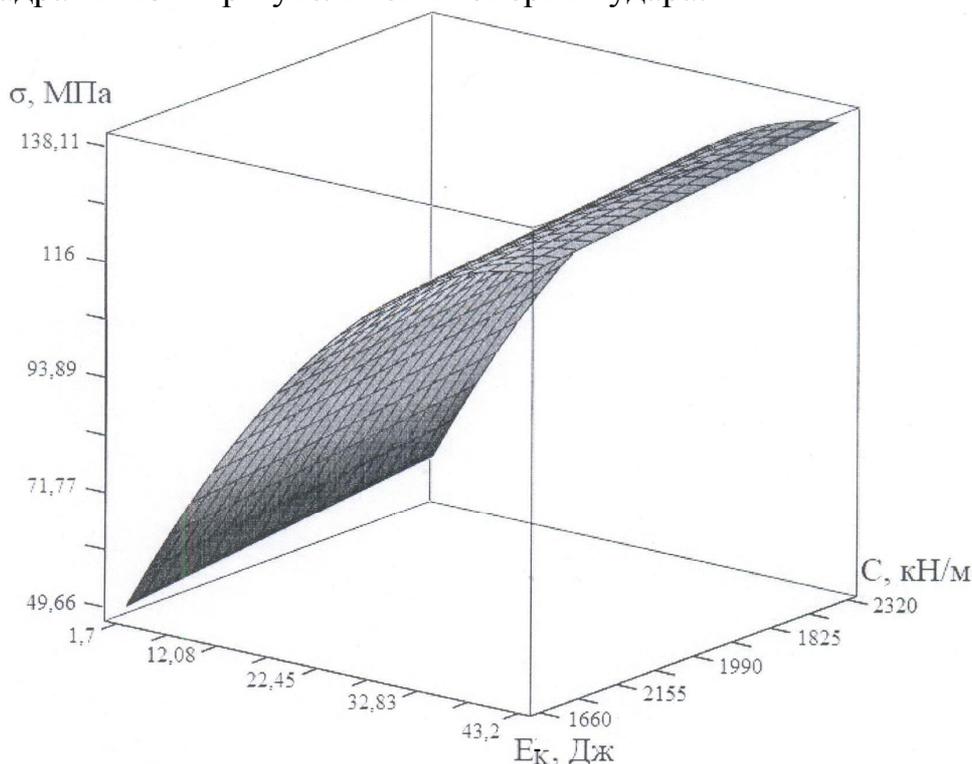


Рис. 3. Зависимость напряжения в коробе от энергии удара и жёсткости пружин

Аналогичным образом установлена регрессионная зависимость величины поглощения энергии удара  $K$  упругими опорами от параметров их суммарной жесткости  $C$  и энергии удара  $E_K$ :

$$K = 50,168 - 0,018C - 1,281E_K + 0,01E_K^2 + 0,00032C \cdot E_K.$$

Высокий коэффициент детерминации  $R^2 = 0,877$  показывает, что 87,7 % вариаций  $K$  объясняется влиянием учтенных в модели факторов. Статистика Фишера  $F=17,8$  свидетельствует об адекватности регрессионного уравнения экспериментальным данным. Коэффициенты регрессии значимы, так как значительно превышают табличное значение Стьюдента ( $t_C = 5,4$ ,  $t_{Eк} = 4,1$ ,  $t_{Eк2} = 3,3$ ,  $t_{SEк} = 2,5$ ). Коэффициент поглощения энергии удара снижается при увеличении жёсткости упругих опор. Следовательно, при выборе упругих опор рабочего органа вибромашины их рациональную или оптимальную жесткость необходимо рассчитывать по двум критериям: обеспечение необходимой амплитуды колебаний для достижения технологических показателей машины и обеспечение ее долговечности по фактору ударных нагрузок от падающих кусков горной массы. Определение численных параметров по последнему фактору является основным при выборе средств защиты рабочего органа вибромашины или приемной площадки (бункера, тетки и т. д.). Наиболее простой метод защиты путем подсыпки слоя сыпучего материала на рабочий орган машины. Эффективность такого подхода исследовалась в работе [1], где указано, что наличие слоя материала различной крупности в несколько раз снижает ударные нагрузки. Однако на практике этот метод не всегда приемлем, поскольку требует жестких условий погрузки и не может быть задан конструктивно. Всевозможные рекомендации по защите рабочих органов машин полимерными и эластомерными покрытиями во многих случаях себя хорошо зарекомендовали. Вместе с тем для решения оптимизационной задачи поиска конструктивных параметров при интенсивных ударных нагрузках необходимы дополнительные исследования.

#### Список литературы

1. Надутый В.П. Анализ ударного взаимодействия кусковой горной массы с рабочими поверхностями машин и оборудования / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, Д.В. Белюшин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / ІГТМ НАН України. – Дніпропетровськ. – 2012. – Вип. 103. – 122-129 с.
2. 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.
3. Грушко И.М. Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. / И.М. Грушко, В.М. Сиденко // Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1983. – 224 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Франчуком В.П.  
Надійшла до редакції 29.04.2013*