

УДК 622.834:622.862.3

### К ВОПРОСУ О СОУДАРЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВНЕЗАПНОМ ОБРУШЕНИИ БОКОВЫХ ПОРОД В ГОРНУЮ ВЫРАБОТКУ

**С. В. Подкопаяв, И. В. Иорданов, Д. А. Чепига**

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»  
пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, Донецкая обл., 85300, Украина. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua

В реальных условиях разработки крутых пластов внезапные обрушения боковых пород представляют собой ударные явления, в результате действия которых расслоившиеся породы кровли изменяют свои физико-механические характеристики. Установлено, что при длине породной консоли непосредственной кровли более 20 м, в результате обрушения боковых пород величина ударного импульса соударяющихся тел остается постоянной. В таких ситуациях критическая нагрузка всегда подобна разрушающей при расчете пород на изгиб. Параметры зависающей консоли, вид ее опор и величина импульса ударных сил при проявлении аварийных ситуаций, связанных с обрушениями боковых пород, определяют устойчивость кровли и почвы, а так же состояние горных выработок при традиционных способах управления горным давлением во время разработки угольных пластов в глубоких шахтах.

**Ключевые слова:** удар, динамические воздействия, скорость, непосредственная кровля, обрушения, травматизм.

### ДО ПИТАННЯ ПРО ЗІТКНЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ ПРИ РАПТОВОМУ ОБВАЛЕННІ БІЧНИХ ПОРІД В ГІРНИЧУ ВИРОБКУ

**С. В. Подкопаяв, І. В. Іорданов, Д. А. Чепіга**

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»  
пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua

В реальних умовах розробки крутих пластів раптові обвалення бічних порід являють собою ударні явища, в результаті дії яких, розшаровані породи покрівлі змінюють свої фізико-механічні характеристики. Встановлено, що при довжині породної консолі безпосередньої покрівлі більше ніж 20 м, в результаті обвалення бічних порід величина ударного імпульсу тіл, які зіштовхуються, залишається постійною. У таких ситуаціях критичне навантаження завжди подібне руйнівному при розрахунку порід на вигин. Параметри завислої консолі, вид її опор і величина імпульсу ударних сил при прояві аварійних ситуацій, пов'язаних з обваленнями бічних порід, визначають стійкість покрівлі і підшви, а також стан гірничих виробок при традиційних способах управління гірничим тиском під час розробки вугільних пластів в глибоких шахтах.

**Ключові слова:** удар, динамічні дії, швидкість, безпосередня покрівля, обвалення, травматизм.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Разработка угольных пластов в Украине характеризуется относительно низким уровнем технико-экономических показателей. В небольшой степени это связано с отсутствием надежных и эффективных способов обеспечения устойчивости горных выработок. В реальных условиях разработки крутых пластов породы междупластья представляют собой чередующиеся слои как угольных пластов и прослоев, так и самых различных пород. Отличительная особенность такого массива заключается в том, что во всех случаях контакт между слоями представлен глинистыми разностями. В зонах разгрузки, глинистые породы увеличиваясь в объеме во времени, отрывают слои более прочных пород и формируют условия для их обрушений [1, 2].

Как показало изучение процесса сдвижений и деформаций боковых пород [3, 4] при выемке угля в нарушенной толще происходит образование характерных зон сдвижения, на динамику и параметры которых в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве и охраны горных выработок.

При традиционных способах управления кровлей полным обрушением или удержанием на кострах (на практике их выполнение не имеет принципиальных различий), в силу специфических особенностей разработки крутых пластов, связанных с углами падения, превышающих углы внутреннего трения пород, под действием сил гравитации расслоившиеся боковые породы, представленные в виде породных блоков различной длины, смещаются вниз. Этим создаются ава-

рийные ситуации, при которых имеют место завалы горных выработок и травматизм горнорабочих. Внезапность возникновения таких опасных ситуаций является одной из особенностей разработки крутых пластов в сложных горно-геологических условиях. Однако это обуславливается не только горно-геологическими, но и горно-техническими факторами. К последним следует относить несоответствие применяемых способов управления кровлей, средств и способов крепления горных выработок конкретным условиям их эксплуатации. Детальный анализ аварий позволяет сделать вывод о том, что во многих случаях основными причинами травматизма по исследуемому опасному производственному фактору, т.е. от обвалов и обрушений пород, является недостаточная изученность природы обрушений и, в связи с этим, принятие ошибочных технических решений.

Опыт работы шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ начинает проявляться такой природный фактор как расслоения боковых пород, оказывающий существенное влияние на последующее поведение пород кровли и почвы. Особенно это просматривается при разработке крутых угольных пластов, где проявляются обвалы и обрушения не только пород кровли, но и сползания почвы пластов, что приводит к возможному травматизму в результате соударения твердых тел при их обрушениях в горную выработку.

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости боковых по-

род при різних способах управління кровлей в очистному забое і охороні горних виработок, найбільше часто використовуються ситуації, визначаєми статическим методом приложення нагрузки. Но в сложных горно-геологических условиях разработки крутых угольных пластов, когда возможны внезапные обрушения пород кровли и сползания пород почвы, необходимо учитывать динамический вид нагрузки боковых пород. Статическое действие нагрузок не ограничивается тем, что напряжения оказываются иными, чем при динамических нагрузках. Просто боковые породы иначе реагируют на динамические нагрузки, чем на медленно возрастающие. В первом случае, при ударном действии нагрузки породы оказываются хрупкими, а во втором – последние, плавно прогибаясь при статическом нагрузении, обладают пластическими свойствами. Поэтому динамические нагрузки всегда опаснее статических нагрузок.

В настоящее время ситуации, в которых происходят соударения твердых тел, привлекают все большее внимание исследователей. Явления соударения изучаются целым рядом классических дисциплин. Многие задачи о соударении с малыми скоростями (менее 250 м/с), относятся к области интересов динамики сооружений и конструкций [5].

Известно [6], что при ударе, деформации разрушения наступают при объемных нагрузках меньше статических, вследствие того, что нагрузки не перераспределяются на весь объем тела из-за конечности скорости передачи механических деформаций.

Общепринято, что в результате соударения твердых тел, в большинстве случаев, имеет место упругое и пластическое деформирование. Поэтому механическая энергия к концу удара восстанавливается лишь частично из-за потерь на образование остаточных напряжений и деформаций. При этом энергия может уходить не только в неупругие деформации, но и в упругие – например, в колебания. В технических расчетах такие потери учитываются коэффициентом восстановления, величина которого зависит от физических свойств материала [7, 8]. Отличие значений коэффициента восстановления от единицы обусловлено вызванными пластическими деформациями на основе предположения локализации деформаций вблизи поверхности взаимодействующих объектов [9, 10].

Теория упругого и пластического ударов рассматривает ряд параметров, характеризующих состояние соударяющихся тел в некотором интервале изменения времени. К последнему следует относить, прежде всего, продолжительность непосредственного контакта между телами при ударе [10–15]. В этом случае, свойства тел характеризуются упругими и пластическими постоянными, которые и определяют их физико-механические характеристики.

Общеизвестно, что к динамическим нагрузкам следует относить удар, который представляет собой совокупность явлений, возникающих при столкновении двух тел. В теории удара [5, 7, 20] принята следующая идеализация этого процесса, когда осуществляется предельный переход к бесконечно большим силам, действующим бесконечно малое

время и имеющим конечный импульс. Однако рассмотрение процесса удара по существу, требует выхода за рамки классической механики, отказа от схемы абсолютно твердого тела и перехода к системе деформируемого тела. Использование классической теории удара в случае соударения твердых тел, может привести к парадоксам [12, 13]. Учитывая то, что ударные явления являются частью аварийных ситуаций, а само разрушение представляет быстродинамический процесс при котором в материале происходит разрушение связей, то необходимо изучить природу разрушения, установить пороговые условия возникновения и протекания этого процесса. Очевидно, для получения реалистического решения, необходимо учитывать контактные деформации, напряжения и продолжительность действия нагрузки.

Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния боковых пород при динамических воздействиях, т.е. внезапных обрушениях боковых пород. Для упрощения рассматриваемой задачи необходимо ввести некоторые допущения. Считаем, что внезапное обрушение боковых пород частично неупругое. При их обрушении справедлив закон сохранения энергии. Исходя из этого, для установления максимальной скорости точки рассматриваемого тела и напряжений, возникающих в результате соударения твердых тел и приводящих к разрушению, нами были проведены аналитические исследования с использованием основных положений теории удара и теоретической механики [5, 8, 15–21].

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Решение рассматриваемой задачи предусматривает допущение о том, что обрушившиеся боковые породы представлены в виде тела, которое совершает свободное падение (рис. 1). Вначале рассмотрим движение тела на бесконечно малом участке АВ, длина которого будет условной и соответствовать  $l_{AB}=0,1\text{м}$ . При  $t=0$ , начальные условия рассматриваемой задачи имеют вид:

$$x_0 = 0; \dot{x}_0 = v_{x_0} = v_0, \quad (1)$$

$$y_0 = 0; \dot{y}_0 = v_{y_0} = 0. \quad (2)$$

Согласно принципа освобожденности от связей [20, 21], рассматриваем тело в виде свободной материальной точки, на которую действует сила тяжести  $m\bar{g}$ , реакция  $\bar{N}$  и сила трения  $\bar{F}_{mp}$ . Тогда дифференциальное уравнение движения точки в декартовых координатах можно представить в виде:

$$m\ddot{x} = \sum_{k=1}^n F_{kx} \quad (3)$$

$$m\ddot{y} = \sum_{k=1}^n F_{ky} \quad (4)$$

и с учетом того, что

$$\ddot{x} = \frac{dv_x}{dt} \quad \text{и} \quad \ddot{y} = \frac{dv_y}{dt}, \quad (5)$$

имеем

$$m \frac{dv_x}{dt} = -F_{mp}, \quad 0 = mg - N. \quad (6)$$

После соответствующих преобразований, получим выражение

$$\frac{dv_x}{dt} = -fg, \quad (7)$$

которое указывает на то, что для рассматриваемых граничных условий движение точки не зависит от ее массы.

С использованием определенных интегралов, учитывая пределы интегрирования

$$\int_{v_0}^{v_x} dv_x = -\int_0^{t_1} fgdt, \quad (8)$$

скорость точки в конце участка АВ определяется по выражению

$$v_x = v_0 - fgt_1, \quad (9)$$

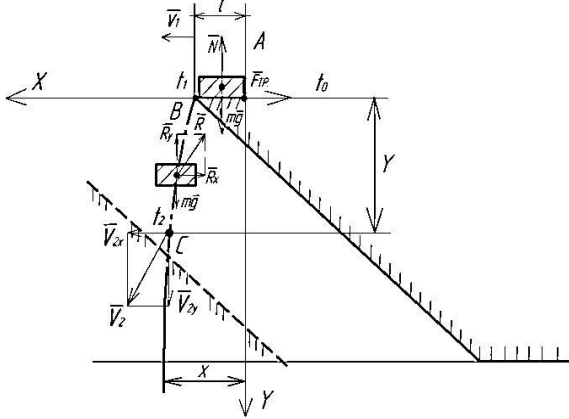


Рисунок 1 – Расчетная схема к определению скорости точки тела – обрушившихся боковых пород

Для того, чтобы определить время  $t_1$  преодоления телом бесконечно малого участка  $l_{AB}=0,1m$  и его скорость в конце этого участка, в выражении (7) введем

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{dv_x}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dv_x}{dx} \cdot v_x. \quad (10)$$

Тогда (7) можно представить в виде

$$\frac{dv_x}{dx} \cdot v_x = -fg. \quad (11)$$

После преобразований и с учетом пределов интегрирования, при  $x=l$ , получим

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 - 2fgl}. \quad (12)$$

Время прохождения участка АВ определяется как

$$t_1 = \frac{v_0 - v_1}{fg}. \quad (13)$$

Теперь рассмотрим движение точки на участке ВС (рис. 1), когда отсчет времени совпадает с началом падения. При  $t = 0$ , начальные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= 0, & \dot{x} &= v_1, \\ y &= 0, & \dot{y} &= 0. \end{aligned}$$

Известно [16, 21], что при падении на материальную точку, действует только сила тяжести  $m\vec{g}$  и дифференциальное уравнение, в этом случае, будет иметь вид:

$$m\ddot{x} = 0, \quad m\ddot{y} = mg$$

или

$$\frac{dv_x}{dt} = 0, \quad \frac{dv_y}{dt} = g.$$

Далее, в соответствии с начальными условиями и после соответствующих преобразований, когда постоянные интегрирования  $C_3 = v_1$  и  $C_4 = 0$ , имеем

$$v_{2x} = v_1, \quad v_{2y} = gt_1,$$

а скорость точки тела на криволинейном участке ВС до удара определяется как

$$v^2 = \sqrt{v_{2x}^2 + v_{2y}^2} = \sqrt{v_1^2 + (gt_1)^2}. \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет определить максимальную скорость точки тела, т.е. обрушившихся боковых пород до соударения с другим телом, в нашем случае, с наклонной площадкой, но без учета силы сопротивления движению.

Для того, чтобы оценить влияние этого фактора и приблизить решаемую задачу к реальным условиям считаем, что тело испытывает силу сопротивления движению [19, 20], когда

$$\vec{R} = -k_c v, \quad (15)$$

где  $k_c$  – коэффициент сопротивления, (Нс/м).

Считается [20, 22], когда на тело действует, кроме силы тяжести, сила сопротивления, направленная по касательной к траектории в сторону, противоположную скорости (рис.1), тогда

$$R_x = -k_c v_x; R_y = -k_c v_y, \quad (16)$$

а дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$m\ddot{x} = -k_c v_x, m\ddot{y} = mg - k_c v_y \quad (17)$$

или

$$\frac{dv_x}{dt} = -\frac{k_c}{m} dv_x, \quad (18)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{k_c}{m} \left( \frac{m}{k_c} g - v_y \right). \quad (19)$$

Используя определенные интегралы, разделив переменные и проинтегрировав уравнения, получим

$$\int_{v_1}^{v_x} \frac{dv_x}{v_x} = -\int_0^t \frac{k_c}{m} dt, \quad (20)$$

$$\int_0^{v_y} \frac{dv_y}{\frac{mg}{k_c} - v_y} = \int_0^t \frac{k_c}{m} dt, \quad (21)$$

$$\ln v_x - \ln v_1 = -\frac{k_c}{m} t, \quad (22)$$

$$\ln \left( \frac{mg}{k_c} - v_y \right) - \ln \left( \frac{mg}{k_c} \right) = -\frac{k_c}{m} t. \quad (23)$$

После преобразований получаем выражение для определения максимальной скорости точки тела до соударения

$$v_2 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (24)$$

Когда  $v_x = v_1 e^{-\frac{k_c t}{m}}$  (25)

и  $v_y = \frac{mg}{k_c} \left( 1 - e^{-\frac{k_c t}{m}} \right)$  (26)

По полученным зависимостям можно установить скорость точки тела, т.е. обрушившихся боковых пород, с учетом их массы и сил сопротивления движению при их внезапном обрушении в горную выработку.

Для определения величины напряжений при соударении твердых тел  $\sigma$  (Н/м<sup>2</sup>), представим породы непосредственной кровли или почвы угольного пла-

ста в виде наклонной площадки, расположенной под углом  $\alpha$ , (град) к горизонту. Направим ось  $\tau$  вдоль этой наклонной площадки, а ось  $n$  – перпендикулярно к ней (рис. 2). Углы  $\alpha$  и  $\beta$ , в точке падения (т. О) являются углом падения и углом отражения [16, 17, 18].

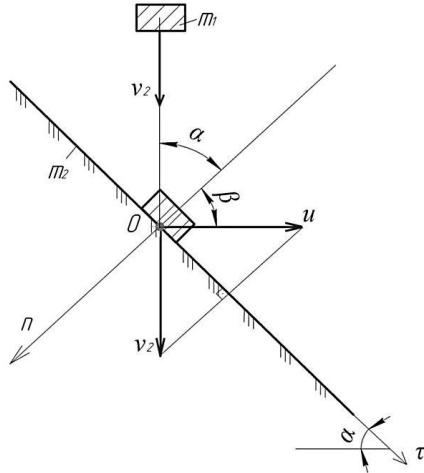


Рисунок 2 – Расчетная схема при ударе тела о наклонную площадку:  $v_2, u$  – соответственно, скорость тела до и после удара, (м/с);  $\alpha, \beta$  – углы падения и отражения, (град)

Определим проекции скорости  $v_2$  центра тяжести тела  $m_1$  в начале удара на оси  $\tau$  и  $n$

$$v_{2\tau} = v_2 \cdot \sin \alpha, v_{2n} = v_2 \cdot \cos \alpha. \quad (27)$$

Проекция на ось  $n$  общности скорости тела и наклонной плоскости в случае неупругого удара, определяется как

$$u_n = \frac{m_1 v_{2n} + m v}{m + m_1}. \quad (28)$$

Считаем, что масса наклонной площадки бесконечно велика, а ее скорость равна нулю, т.е. при  $m \rightarrow \infty$  и  $v = 0, u_n \rightarrow 0$ .

Определим проекции скорости центра тяжести тела на ось  $\tau$  при соударении как

$$u_{1\tau} = v_{2\tau} = v_2 \sin \alpha. \quad (29)$$

Проекция скорости центра тяжести тела на ось  $n$  определяется выражением

$$u_{1n} = u_n + k(u_n - v_{2n}). \quad (30)$$

С учетом того, что  $u_n = 0$ , имеем

$$u_{1n} = -k v_{2n} = -k v_2 \cos \alpha. \quad (31)$$

При изучении соударения твердых тел о наклонную поверхность было установлено, что с увеличением угла наклона поверхности с  $\alpha=40$ град до  $\alpha=60$ град, значения коэффициента восстановления изменяется от  $k=0,6$  до  $k=0,91$  [6].

Поскольку в настоящее время нет проверенных опытом динамических критериев разрушения боковых пород при их внезапном обрушении, для получения некоторого представления об областях ударного повреждения, воспользуемся следующим методическим приемом, который позволит установить величины напряжений, приводящих к разрушению горных пород при их соударении.

Рассмотрим породы непосредственной кровли в виде балки, которая имеет неподвижные шарнирные опоры и подвержена действию продольных усилий. При обрушении пород поперечная сила вызывает прогиб, а при совместном действии нагрузок, балка будет испытывать продольно-поперечный изгиб.

Считаем, что напряжения, возникающие в такой балке - наклонной площадке при соударении можно определить как в [6]:

$$\sigma = v \sqrt{\frac{E \cdot \rho}{2}}, \quad (32)$$

где  $v$  – значение скорости тела при соударении твердых тел, м/с;  $E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

В случае рассматриваемой задачи, с учетом вышеизложенного

$$\sigma = v_2 \cdot \cos \alpha \sqrt{\frac{E \cdot \rho}{2}}. \quad (33)$$

Для надежной работы рассматриваемой системы, т.е. эксплуатационного состояния горной выработки, необходимо, чтобы все ее элементы были устойчивы. Это достигается определенными условиями деформирования балки, когда величины возникающих в ее сечении напряжений не превышают предельных значений. Относительно пород непосредственной кровли и почвы разрабатываемых угольных пластов, при различных видах опор, балка должна деформироваться в установленных пределах, когда выполняются соответствующие условия прочности для определенного типа пород. Исходя из этого, для условий рассматриваемой задачи определим величину критических напряжений, вызывающих потерю устойчивости балки, исходя из формулы Эйлера [23]. Такую зависимость можно представить в виде, когда

$$\sigma_{don} = \frac{\pi^2 E}{\lambda}, \quad (34)$$

где  $E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – гибкость балки, м.

Гибкость балки можно определить как

$$\lambda = \frac{k_l l}{r}, \quad (35)$$

где  $k_l$  – коэффициент приведенной длины балки;  $l$  – длина балки, м;  $r$  – радиус инерции балки, м.

На рис. 3а, б показано изменение величины напряжений в породах непосредственной кровли – балке. При этом учитывалось изменение скорости соударения твердого тела о балку (а) и ее гибкости (б).

В результате выполненных исследований установлено, что с увеличением скорости соударения обрушенных пород с балкой, напряжения возникающие в наклонной площадке при ударе, так же имеют тенденцию к росту (рис. 3 а).

Зависимость, представленная на рис. 3 б показывает, что по мере возрастания гибкости балки критическое напряжение  $\sigma_{don} \rightarrow 0$ , и, наоборот, по мере приближения гибкости балки к нулю, т.е.  $\lambda \rightarrow 0$ , критическое напряжение  $\sigma_{don} \rightarrow \infty$ .

При этом необходимо учитывать условия применимости формулы Эйлера (34), которая имеет ограничения, учитывающие момент потери устойчивости балки, а именно, когда напряжения, действующие в любом ее сечении, не превышают предела пропорциональности. В тех случаях, когда такие условия не выполняются, разрушение балок будет происходить от действующих напряжений в результате их изгиба, когда последние достигают своих предельных значений.

Для таких условий, пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки

$$\lambda_{np} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (36)$$

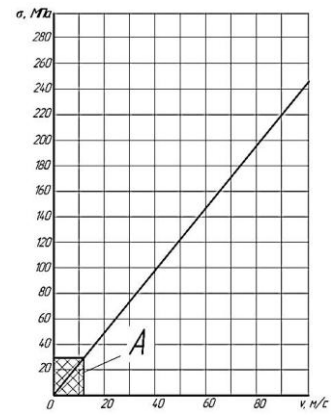
где  $[\sigma_{изг}]$  – предел прочности пород непосредственной кровли на изгиб, Н/м<sup>2</sup>.

Этот параметр зависит только от физико-механических свойств материала. С учетом этого, выражение (34) дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости рассматриваемой балки, в условиях, когда принимают во внимание физико-механические свойства боковых пород.

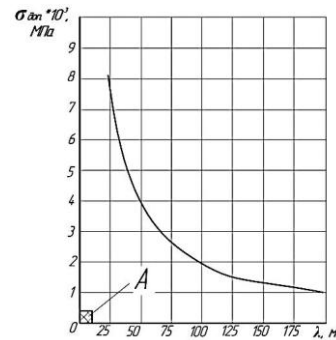
Приведенные зависимости (рис. 3 а, б) дают значения нагрузок, при которых происходит потеря устойчивости рассматриваемой системы в зависимости от скорости соударения тел при их обрушении в выработку и физико-механических свойств расслоившихся боковых пород. Очевидно, за пределами условной зоны (зона А, рис. 3, а, б), находится область неустойчивого состояния боковых пород. По сути, в этой области с момента наступления критического состояния и до момента разрушения, деформации рассматриваемой системы нарастают крайне быстро. Из этого следует, что при расчете на устойчивость пород кровли или почвы разрабатываемого угольного пласта при внезапном обрушении боковых пород в горную выработку, критическая нагрузка всегда подобна разрушающей при расчете балок на изгиб. Очевидно напряжения, возникающие в ударяемом теле с учетом скоростей соударения более 15-30 м/с, могут заметно изменить механические характеристики боковых пород. Во многих случаях изменение может быть настолько существенным, что будет оказывать влияние не только на картину разрушения, но и на природу самого разрушения. В связи с этим, представляют определенный интерес исследования изменения величины модуля Юнга для различного вида опирания балок и динамических нагрузок.

Общеизвестно, что при ударе, в соударяющихся телах совершаются различные процессы, в результате которых происходит потеря кинетической энергии. Соударение твердых тел приводит также к появлению различных колебательных движений. Тем не менее, потерянную при ударе кинетическую энергию можно определить согласно рекомендаций [10] как

$$\Delta T = \frac{m_1 v_2^2 \cos \alpha}{2} (1 - k^2) \quad (37)$$



а)



б)

Рисунок 3 – Изменение величины напряжений в породах непосредственной кровли – балке: а) с учетом вариации скорости соударения обрушившихся боковых пород; б) с учетом вариации гибкости балки; А – зона устойчивости для глинистого сланца средней устойчивости

На основании зависимости (37), нами была установлена корреляция потерь кинетической энергии при соударении падающего тела массой  $m$  о наклонную площадку (рис. 4). При этом варьировали такими параметрами как масса тела и его скорость, при различных видах удара. Вид последнего определялся принятой величиной коэффициента восстановления ( $k$ ). Так, в результате выполненных исследований было установлено, что увеличение скорости и массы падающего тела, приводит к увеличению потерь кинетической энергии. Причем максимальные потери имеют место при скоростях более 90 м/с. Необходимо отметить, что при ударе близком к упругому (кривая 1, 4, когда  $k=0,8$  на рис. 4), даже при скорости соударения  $v > 90 \text{ м/с}$ , имеем минимальные потери кинетической энергии, в сравнимых условиях.

По всей видимости, это можно объяснить твердостью материала, что отражено в результатах исследований [6, 9]. Минимум потерь кинетической энергии при скоростях соударения до 20 м/с, обуславливается минимальными диссипативными потерями на деформацию. В целом, количество потерянной кинетической энергии, при ударе, когда система находится в чрезвычайных условиях нагружения, зависит от ее начальной жесткости, физико-механических свойств боковых пород и скорости соударения твердых тел.

Известно [6–9], что когда одно твердое тело внезапно соударяется с другим, такое взаимодействие считается импульсивным. Импульсивная нагрузка отличается от обычной нагрузки прежде всего внезапностью ее приложения и кратковременностью действия.

Величину ударного импульса, в этом случае, можно определить как в [20, 22], по выражению

$$S = \frac{m \cdot m_1}{m + m_1} v_2 \cos \alpha, \quad (38)$$

где  $m$  – масса балки (наклонной площадки), кг.

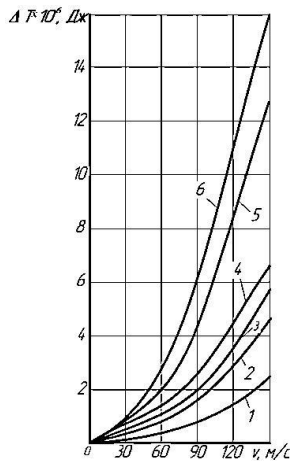


Рисунок 4 – Изменение потерянной при ударе кинетической энергии от скорости соударяющихся тел: при массе обрушившихся пород  $m=1000$  Н и различных значениях коэффициента восстановления: 1 –  $k=0,8$ , 2 –  $k=0,5$ , 3 –  $k=0,2$ ; при массе  $m=3000$  Н и 4 –  $k=0,8$ , 5 –  $k=0,5$  и 6 –  $k=0,2$

На рис. 5 представлены зависимости, отражающие изменение импульса ударной силы соударяющегося тела с балкой, с учетом изменения ее длины. В качестве влияющих на этот процесс параметров, которые нами изменялись, были выбраны скорость соударения твердого тела с балкой и его масса. В результате выполненных исследований было установлено, что при длине балки  $l > 20$  м, величина ударного импульса не изменяется при постоянных значениях скорости и массы обрушившихся боковых пород. В таких условиях, при соударении твердых тел, когда расслоившиеся породы основной кровли ударяются о балку – породы непосредственной кровли, величина импульса ударной силы остается постоянной и не зависит от массы ударяемого тела (рис. 5).

Решающее значение при исследовании удара имеет промежуток времени, определяющий продолжительность динамического контакта между соударяющимися телами. В случае, когда обрушившаяся порода ударяется о породы непосредственной кровли, представленные в виде балки определенной длины, максимальную продолжительность действия такой нагрузки можно определить согласно [20], как

$$t_{\max} = \pi \sqrt{\frac{ml^3}{48EI}}, \quad (39)$$

где  $m$  – масса обрушившихся боковых пород, Н;  $l$  – длина балки, м;  $E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;  $I$  – момент инерции сечения балки, см<sup>4</sup>.

На рис. 6, с использованием выражения (39) получена зависимость изменения продолжительности действия динамической нагрузки при соударении тела массой  $m$  с балкой.

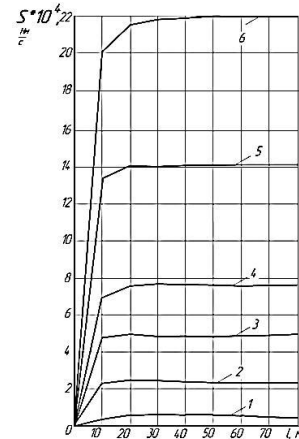


Рисунок 5 – Изменение импульса ударной силы обрушившихся пород о балку при изменении ее длины: при массе обрушившихся пород  $m=1000$  Н и скорости соударения 1 –  $v=10$  м/с; 2 –  $v=50$  м/с; 3 –  $v=100$  м/с; 3 –  $v=150$  м/с; при массе  $m=3000$  Н и соответственно 5 –  $v=10$  м/с; 6 –  $v=150$  м/с

Учитывая физико-механические свойства горных пород Донбасса, например, глинистый сланец средней устойчивости, нами установлено, что при увеличении длины балки и массы обрушившихся боковых пород существенно увеличивается продолжительность действия динамической нагрузки в результате контактного взаимодействия твердых тел. Так, при увеличении длины балки с  $l=20$  м до  $l=60$  м при массе обрушившихся пород  $m=1000$  Н, продолжительность контакта увеличивается с  $t_{\max}=0,02$  с до  $t_{\max}=0,152$  с. В этом диапазоне увеличения длины балки, но в случае, когда  $m=3000$  Н, т.е. увеличивается в 3 раза, продолжительность такого контакта возрастает до  $t_{\max}=0,27$  с, т.е. повышается почти в 2 раза (рис. 6). Очевидно, это связано с деформацией тел, увеличением статического прогиба балки при приросте ее длины и одновременно уменьшении жесткости.

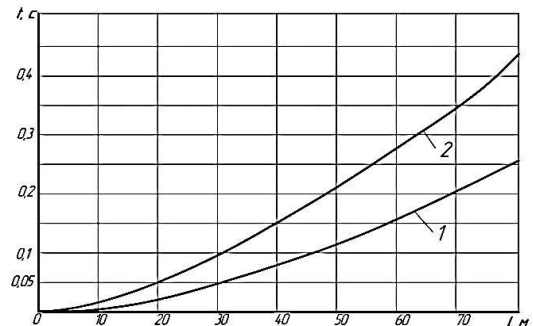


Рисунок 6 – Изменение продолжительности удара обрушившихся боковых пород в результате соударения с непосредственной кровлей при различной длине породной консоли - балки: 1 – масса обрушившихся пород  $m=1000$  Н; 2 – то же  $m=3000$  Н

Очевидно, при определении времени взаимодействия твердых тел в результате их столкновений, необходимо учитывать не только их физико-механические свойства и изменение этих свойств за время удара, но так же характер начальных и граничных условий. Решение этой проблемы существенно усложняется еще и тем, что ввиду отсутствия данных о поведении конкретного материала при различного рода динамических нагрузках, в соответствующие расчеты вводится ряд упрощающих допущений, что может привести к искажению некоторых результатов.

**ВЫВОДЫ.** Таким образом, опасность возникновения аварийных ситуаций при разработке пластов крутого падения проявляется в результате расслоения углепородного массива, как правило, при внезапных обрушениях пород кровли и сползаниях пород почвы. Этим создаются условия, при которых в результате обрушения боковых пород возможны завалы горных выработок. Влияние ударного действия в такой обстановке изменяет физико-механические характеристики боковых пород. Очевидно, параметры зависящей породной консоли на значительных площадях, при отсутствии надежного подпора со стороны выработанного пространства, в результате проявления динамических нагрузок (внезапных обрушений боковых пород), определяют состояние пород кровли и почвы, а так же эксплуатируемых горных выработок. При этом необходимо учитывать свойства боковых пород, способ управления кровлей в лаве и охраны горных выработок.

В реальных условиях разработки крутых угольных пластов внезапные обрушения боковых пород представляют собой ударные явления, что влечет за собой создание аварийных ситуаций, которые сопровождаются, как правило, завалами горных выработок и травматизмом горнорабочих. Очевидно, в таких условиях следует ориентироваться на применение универсального способа управления горным давлением и охраны горных выработок, который позволит повысить устойчивость боковых пород нарушенной толщи и сохранить горные выработки в эксплуатационном состоянии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Снижение травматизма от проявлений горного давления / В.И. Николин, С.В. Подкопаев, А.В. Агафонов, Н.В. Малеев – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 332 с.
2. Левкин Н.Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины. – Донецк: Донбасс, 2002. – 393 с.
3. Жуков В.Е. Об одной стратегической ошибке в разрешении проблемы разработки крутых пластов // Уголь Украины. – 2001. – № 7. – С. 6–10.
4. Сдвижение и разрушение горных пород / С.Д. Викторов, М.А. Иофис, С.А. Гончаров – М.: Наука, 2005. – 277с.
5. Динамика удара // Дж.А. Зукас, Т. Николас, Х.Ф. Свифт, Л.Б. Грашук, Д.Р. Курран – М.; Мир, 1985 – 296 с.

6. Кочетков А.В., Федоров П.В. Некоторые вопросы теории удара // Науковедение. Интернет-журнал. № 5. – 2013 – С. 1–15 / <http://publ.naukovedenie.ru>

7. Лапшин В.В. Удар тела о препятствие // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. – Вып. 12. – 17 с. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1134.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2013-12-1134.

8. Тригуб А.М., Штагер Е.В. Приближенные способы оценки коэффициента восстановления при соударении твердых тел // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5. – 1. – С. 91–93; URL: <https://www.top.technologies.ru/ru/article/view?id=33723>.

9. Удар тела о наклонную поверхность / Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, С.И. Корягин, Д.А. Тарасов. // Вестник Балтийского федерального ун-та. Серия: Физико-мат. и техн. Наук. – 2013. – Вып. 10. – С. 36–42.

10. Лапшин В.В., Юрин Е.А. Нелинейная упругопластическая модель коллинеарного удара // Вестник МГТУ им Н.Э.Баумана. Сер. Естественные науки. – 2016. – №1 – С. 90–99 DOI:10.18698/1812-3368-2016-1-90-99.

11. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. – М.: Наука, 1989. – 510 с.

12. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. – М.: Международная программа образования. 1997. – 336 с.

13. Иванов А.П. Задача об ударе твердых тел // Соросовский образовательный журнал. Т. 7. – № 5, 2001. – С. 122–127.

14. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнич.ун-та, 2009. – 594 с.

15. Ginsberg I. Engineering Dynamics. Cambridge University Press. 2008. – 726 p. – ISBN:0521883032.

16. Gross D., Ehlers W., Wriggers P, Schroder I, Muller R. Dynamics – Formulas and Problems: Engineering Mechanics. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017. – 249 p. – ISBN: 3662534363.

17. Baruh H. Applied Dynamics. Taylor Francis Group. LLS., 2015. – 872p. – ISBN:148225073X.

18. Kleppner D., Kolenkow R. An Introduction to Mechanics. – Cambridge University Press, 2014., 542 p. – ISBN:978-0-521-19811-2.

19. Ochsner A. Computational Statics and Dynamics: An Introduction Based on the Finite Element Method. – Springer Science Business Media, Singapore, 2016. – 426 p. – ISBN,-10:9811007322.

20. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. – К.: Наукова думка, 1969. – 246 с.

21. Горбан Н.И. Теоретическая механика. Динамика. – Минск: Высш.школа, 2012. – 320 с.

22. Strauch D. Classical Mechanics: An Introduction. – Springer, 2009. – 422 p. – ISBN:3540736158.

23. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002. – 912 с.

**ON THE STRESS-STRAIN STATE OF THE WALL ROCKS  
AT THE SUDDEN COLLAPSE OF THE MAIN ROOF**

**S. Podkopaev, I. Yordanov, D. Chepiga**

Public higher education institution «Donetsk National Technical University»

pl. Shbankova, 2, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua

**Purpose.** To determine of the stress-strain state of the lateral rocks during sudden collapse of the roof rocks. **Methodology.** Complex methods of research using the basic provisions of theoretical mechanics and impact theory have been used. **Results.** The parameters of the hanging rock console, the type of its support and the magnitude of the impulse force pulse in the occurrence of emergency situations associated with the collapse of the lateral rocks, determine the stability of the roof and the soil of the developed formation, as well as the state of the mine workings have been established. **Originality.** With the length of the rock console of the direct roof over 20 m, as a result of the collapse of the lateral rocks, the magnitude of the impact pulse of the colliding bodies as a result of sudden caving remains constant has been established. **Practical value.** Measures aimed at increasing the stability of mine workings in the development of coal seams in difficult mining and geological conditions have been developed. **Conclusions.** In order to prevent sudden collapses of lateral rocks in the development of steep coal seams, one should be guided by the use of a universal method for controlling rock pressure and protecting mine workings has been proved. References 23, figures 6.

**Key words:** shock, dynamic impacts, speed, caving, injuries.

REFERENCES

- Nikolin, V.I., Podkopaev, S.V., Agafonov, A.V., Maleev, N.V. (2005), *Snizhenie travmatizma ot proyavlenij gornogo davlenija* [Injury Reduction of manifestations of rock pressure], Nord-Press, Donetsk, Ukraine.
- Levkin, N.B. (2002), *Predotvraschenie avariij i travmatizma v ugolnyih shahtah Ukrainyi* [Prevention of accidents and injuries in the coal mines of Ukraine], Donbass, Donetsk, Ukraine.
- Zhukov, V.E. (2001) "About one strategic error in solving the problem of the development of steep seams" // *Coal of Ukraine*, no.7, pp. 6–10.
- Viktorov, S.D., Iofis, M.A., Goncharov, S.A. (2005), *Sdvizhenie i razrushenie gornih porod* [Shift and destruction of rocks], Nauka, Moscow, Russia.
- Zukas, Dzh.A., Nikolas, T., Svift, H.F., Grashchuk, L.B., and Kurran, D.R. (1985) *Dinamika udara* [Dynamics strike], Mir, Moscow, Russia.
- Kochetkov, A.V., and Fedorov, P.V. (2013) "Some issues impact theory", *Naukovedenie. Online Magazine*, – no. 5, – pp. 1–15, available at: <http://publ.naukovedenie.ru>.
- Lapshin, V.V. (2013) "The impact of the body on the obstacle", *Journal of Engineering: Science and Innovation*. – no. 12. – p. 17. URL: <http://engjournal.ru/catalog/eng/teormech/1134.html> DOI: 10.18698/2308-6033-2013-12-1134.
- Trigub, A.M., and Shtager, E.V. (2014) "Approximate methods for assessing the recovery factor in the collision of solids", *Modern high technologies*, no. 5, available at: <https://www.top.-technologies.ru/ru/article/view?id=33723>.
- Velikanov, N.L., Naumov, V.A., Koryagin, S.I., Tarasov, D.A. (2013) "The impact of the body on an inclined surface", *Bulletin of the Baltic Federal University. Series: Physics and mathematics. and techn. science*. – Vol. 10 – pp. 36–42.
- Lapshin, V.V., and Yurin, E.A. (2016) "The nonlinear elastic-plastic model of the collinear shock" *Bulletin Bauman MSTU*, series Natural Sciences, no. 1, pp.90–99. DOI:10.18698/1812-3368-2016-1-90-99.
- Dzhonson, K. (1989) *Mehanika kontaktного vzaimo-deystviya* [Contact mechanics], Nauka, Moscow, Russia.
- Ivanov, A.P. (1997) *Dinamika sistem s mehanicheskimi soudareniami* [Dynamics of systems with mech], International Education Program, Moscow, Russia.
- Ivanov, A.P. (2001) "The problem of the impact of solids", *Soros Educational Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 122–127.
- Birbraer, A.N., and Roleder, A.Yu. (2009) *Ekstremalnyie vozdeystviya na sooruzheniya* [Extreme effects on structures], Izd-vo Politehn. un-ta, SPb., Russia.
- Ginsberg, I. *Engineering Dynamics*. Cambridge University Press. 2008. – 726 p. – ISBN:0521883032.
- Gross, D., Ehlers, W., Wriggers, P, Schroder, I, Muller, R. *Dinamics – Formulas and Problems: Engineering Mechanics*. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017. – 249p. – ISBN: 3662534363.
- Baruh, H. *Applied Dynamics*. Taylor Francis Group. LLS., 2015. – 872p. – ISBN:148225073X.
- Kleppner, D., Kolenkow, R. *An Introduction to Mechanics*. – Cambridge University Press, 2014., 542 p. – ISBN:978-0-521-19811-2
- Ochsner, A. *Computational Statics and Dynamics: An Introduction Based on the Finite Element Method*. – Springer Science Business Media, Singapore, 2016. – 426p. – ISBN: 10:9811007322.
- Kilchevskiy, N.A. (1969) *Teoriya soudareniya tverdyih tel* [The theory of the collision of solids], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
- Gorban, N.I. (2012) *Teoreticheskaya mehanika. Dinamika* [Theoretical mechanics. Dynamics], Vyssh.shkola, Minsk, Belarus.
- Strauch, D. *Classical Mechanics: An Introduction*. – Springer, 2009. – 422p. – ISBN:3540736158.
- Tsigler, F. (2002) *Mehanika tverdyih tel i zhidkostey* [Mechanics of solids and liquids], SIC "Regular and chaotic dynamics", Izhevsk, Russia.

Стаття надійшла 27.03.2017.