

УДК 621.92

*Павлиненко О. И.,  
Власенко Д. А.,  
к.т.н. Левченко Э. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)*

## **АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИЁМЫ ОБОСНОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАСКАЛЫВАНИЯ СТАЛЬНОЙ ДРОБИ СТЕСНЁННЫМ УДАРОМ**

*На основании контактной теории ударного взаимодействия упругих тел, предложенной Герцем, проведено аналитическое исследование условий разрушения шарообразных тел при ударном контакте и обоснованы зависимости для определения основных параметров процесса раскалывания стальной дроби стеснённым ударом. В результате получены зависимости для определения необходимых скоростей соударения, диаметров и масс ударного элемента и дроби для обеспечения условий гарантированного разрушения материала.*

**Ключевые слова:** *стеснённый удар, раскалывание, дробь, теория контактного взаимодействия Герца, контактные напряжения, скорость соударения, масса ударного элемента.*

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Дробеструйные работы с применением колотой стальной дроби выполняются при очистке различных металлических поверхностей трубопроводов, поковок, металлопроката, для дополнительного упрочнения деталей, работающих под нагрузкой, при очистке котельных агрегатов, различных поверхностей перед покраской и прочих подготовительных работах. Правильный анализ и обоснование подготовки стальной колотой дроби для дробеструйных и дробемётных работ является залогом обеспечения высокого качества очистки металлических конструкций и деталей.

Дробь стальная литая выпускается в полном соответствии с российскими нормами по ГОСТ 11964–81 [1], а также установленными международными требованиями и стандартами. Литая дробь производится из расплавленного металла по технологии, позволяющей получить абразив с высокими показателями стойкости и упругости. Различают три основных способа получения абразивного материала: дробление струи расплавленного металла механическим способом, распыление жидкого металла с помощью форсунок, диспергирование потоками энергоносителя. Наи-

большее распространение получил метод механического дробления (раскалывания), при котором колотая дробь получается с помощью дробления сферической литой дроби и имеет форму неправильного многогранника. Для получения колотой дроби производится плавка стали, литьё сферической дроби и последующее её дробление в специальных ударных или шаровых мельницах или валковых дробилках.

**Постановка задачи.** Задачей данных исследований являются анализ и математическое обоснование зависимостей основных параметров процесса раскалывания металлической дроби с помощью стеснённого удара на основании положений классической теории упругости Герца при контактном взаимодействии.

**Изложение материала и его результаты.** Для математического моделирования условия разрушения металлической дроби стеснённым ударом [2, 3] необходимо определить основные параметры контактного взаимодействия ударного элемента и разрушаемого материала: массу ударного элемента и его скорость при ударном контактном взаимодействии с дробимым материалом. Для их определения приняты следующие допущения:

– дробь представляется в виде шара;

– силами трения при ударном контакте ударного элемента и дроби пренебрегаем (вследствие их незначительного влияния на параметры процесса раскалывания);

– при дроблении на все дробинки действует прямой упругий центральный удар;

– условно принимаем, что при ударном взаимодействии отсутствует относительное движение (скольжение) по поверхности дробимого материала.

Для разрушения упругого материала необходимо создать в нём достаточное напряжение [4, 5].

Предположим, что при контакте ударного элемента с дробинками, находящимися на рабочей поверхности, происходит одноосная деформация (сжатие), при которой обеспечиваются предельные условия перехода в пластическое состояние, а критерий разрушения целостности дробимого материала (первая теория прочности) имеет, соответственно, следующий вид [4, 5]:

$$\sigma_{дин} \leq \sigma_{уд}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{дин}$  — динамический предел прочности раскалываемого материала, МПа [4]:

$$\sigma_{дин} = k_{\delta} \sigma_{ст.сж}, \quad (2)$$

где  $k_{\delta}$  — коэффициент отношения динамического предела прочности материала к статическому (определяется экспериментально или на основании предыдущих исследований [5, 6]);  $\sigma_{ст.сж}$  — статический предел прочности на сжатие материала, МПа [4, 5];

$\sigma_{уд}$  — напряжение, возникающее в отдельных дробинках при соударении с ударным элементом, МПа.

В реальных условиях статический предел прочности на сжатие для сталей значительно превышает предел прочности при растяжении и определяется при помощи следующей аналитической зависимости:

$$\sigma_{ст.сж} = k_{\sigma} \sigma_{ст.р}, \quad (3)$$

где  $k_{\sigma}$  — коэффициент пропорциональности статического и динамического преде-

лов прочности материала [6];  $\sigma_{ст.р}$  — статический предел прочности на растяжение (сжатие) дробимого материала, МПа [4].

Контактное взаимодействие слоя дроби, ударных элементов и рабочей поверхности представлено на схеме (рис. 1).

Определим напряжение, возникающее в материале при ударе по слою дроби, с помощью математической модели упругого контакта Герца [7] простых поверхностей.

В первую очередь необходимо определить параметр  $\chi$ , называемый местным смятием тел, величина которого равна отношению смещению центров масс молота и дробинки. Термин «смятие» употребляется в связи с тем, что относительное перемещение соударяемых тел при силовом контакте происходит в основном вследствие деформации (смятия) их в зоне касания [7].

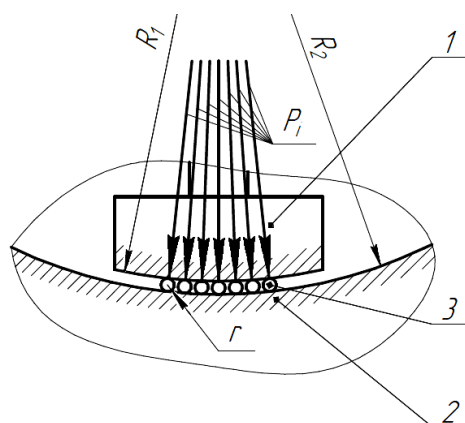
В момент обращения скорости ударного элемента относительного смещения  $\dot{\chi}$  при ударном контакте в ноль величина  $\chi$  достигает максимального значения:

$$\chi_{\max} = \left( \frac{10 m_y V^2}{4K} \right)^{\frac{2}{5}}, \quad (4)$$

где  $m_y$  — масса ударного элемента, кг;  $V$  — скорость, при которой происходит соударение [5, 7], м/с;  $K$  — коэффициент, зависящий от геометрических и физико-механических свойств материалов ударного элемента и дроби:

$$K = \frac{4 \sqrt{\frac{rR_1}{r+R_1}}}{3 \left( \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (5)$$

где  $r$  — радиус дробинки, м;  $R_1$  — радиус кривизны рабочей поверхности ударного элемента, м;  $\mu_1, \mu_2$  — коэффициенты Пуассона материалов ударного элемента и дробинки,  $E_1, E_2$  — модули упругости материалов взаимодействующих тел, МПа.



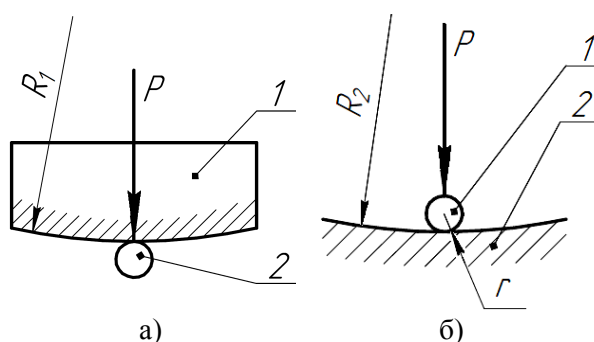
1 — ударный элемент; 2 — рабочая поверхность;  
3 — слой дробы

Рисунок 1 Схема взаимодействия ударного элемента с дробью и рабочей поверхностью

Согласно исследованиям [7] сила удара при контакте сферических тел при условии, когда одно тело неподвижно, а другое ударяется со скоростью  $V$ , определяется как

$$P_y = K \left( \frac{5 m_y V^2}{4 K} \right)^{\frac{3}{5}}. \quad (6)$$

Рассмотрим условие контакта ударного элемента с дробью и рабочей поверхностью (рис. 2).



а) при контакте с ударным элементом  
(1 — ударный элемент; 2 — дробь);  
б) при контакте с рабочей поверхностью  
(1 — дробь; 2 — рабочая поверхность)

Рисунок 2 Схема для определения основных параметров взаимодействия с дробью

При ударном контакте происходит деформация взаимодействующих тел и возникают напряжения, определяемые по зависимостям, основанным на решении задачи Герца об упругом контакте тел сферической формы, имеющих решение в замкнутой форме [7, 8]:

– для контактного взаимодействия с рабочей поверхностью ударного элемента и дробинки (рис. 2, а):

$$Q_1 = 0,918 \sqrt[3]{P_y \frac{\left( \frac{r + R_1}{2rR_1} \right)^2}{\left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}}; \quad (7)$$

– для ударного контакта дробинки с рабочей поверхностью (рис. 2, б):

$$Q_2 = 0,918 \sqrt[3]{P_y \frac{\left( \frac{R_2 - r}{2rR_2} \right)^2}{\left( \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}}, \quad (8)$$

где  $R_2$  — радиус кривизны рабочей поверхности, м.

По результатам численного решения определено, что наибольшее напряжение в дробинке возникает в зоне контакта с ударным элементом.

Для обеспечения требуемой производительности необходимо реализовать гарантированное разрушение (раскалывание) материала при одиночном ударном взаимодействии ударного элемента с необходимым количеством дробимого материала, обладающего идентичной структурой и физико-механическими свойствами  $N_{др}$ . В этом случае сила удара равномерно распространяется на весь дробимый материал.

Исходя из этого, формула, основанная на теории контактного взаимодействия Герца [7], для определения нормального напряжения, возникающего на площадке

контакта двух тел (с учётом зависимостей (1–6)), будет выглядеть

$$Q_H = 0,628 \frac{\sqrt[5]{V^2 m_y \Theta^4 R_{np}^3}}{\sqrt[3]{N_{\partial p}}}, \quad (9)$$

где  $\Theta$  — коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материалов ударного элемента и дроби:

$$\Theta = \left( \frac{E_1 E_2}{E_1 (1 - \mu_1^2) - E_2 (\mu_2^2 - 1)} \right), \quad (10)$$

где  $R_{np}$  — приведённый радиус кривизны поверхности контактирующих тел, м:

$$R_{np} = \frac{r + R_1}{r R_1}. \quad (11)$$

Из формулы (9) получаем зависимость для определения максимального количества дробинки, при котором обеспечивается их раскалывание в процессе реализации одиночного стеснённого удара:

$$N_{\partial p} = 0,248 \frac{\sqrt[5]{(V^2 m_y \Theta^4 R_{np}^3)^3}}{(\sigma_{дин})^3}. \quad (12)$$

Для наглядного отображения зависимости количества дробинки, раскалываемых при наложении одиночного центрального упругого ударного контакта рабочим органом, от массы ударного элемента и его скорости при взаимном контакте с массивом материала (12) на рисунке 3 отображён пространственный график поверхности в зависимости от массы ударника в пределах от 100 до 200 кг и от скорости соударения от 1 до 3 м/с.

При расчётах задавались следующие значения параметров, входящих в зависимость (12): материал дроби — сталь литая 80ГСЛ [1] с твёрдостью 450–470 HV и пределом статического временного сопротивления на сжатие  $\sigma_{ст.сж} = 1020$  МПа (коэффициенты пропорциональности:  $k_\sigma = 1,7$ ,  $k_\sigma = 1,8$ ); радиус отдельной дробинки — 3 мм. При этом радиус кривизны рабочей поверхности ударного элемента задавался 1 м. Модуль упругости и коэффициент Пуассона для материала дроби принимались 205 ГПа и 0,33 соответственно.

На рисунке 3 отображён график зависимости (12) для идеальных условий контакта ударного элемента с дробью.

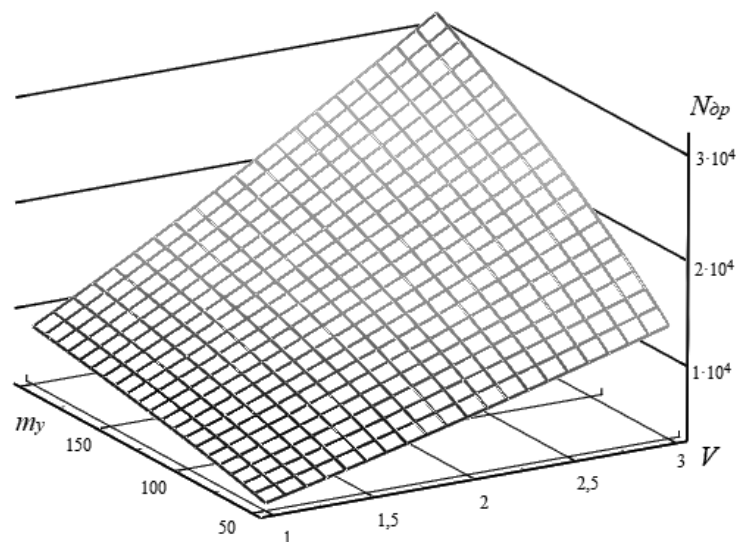


Рисунок 3 График зависимости количества частиц дроби, раскалываемых одиночным ударом молота, от массы ударного элемента и его скорости

Для анализа влияния величин массы и скорости ударного элемента на количество раскалываемых дробинок отображены графики зависимости (12) с фиксированными значениями  $m_y = 100$  кг (рис. 4) и  $V = 3$  м/с (рис. 5).

Как видно из графиков, представленных на рисунках 4 и 5, скорость удара влияет на количество раскалываемой дроби в степенной зависимости с иррациональным показателем больше единицы, а масса — в степенной зависимости с положительным иррациональным показателем меньше единицы. Это даёт возможность утверждать, что скорость удара оказывает большее воздействие на эффективность раскалывания дроби по сравнению с влиянием массы ударного элемента при одинаковых условиях. При увеличении этих показателей влияние массы снижается, а скорости — повышается.

Для обоснования основных технологических параметров процесса ударного контакта при дроблении материала, требующихся для обеспечения определённых условий раскалывания материала при стеснённом ударе, предлагается использовать следующие теоретические закономерности:

– для определения требуемой массы ударного элемента:

$$m'_y = \frac{468(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{V^2 R_{нр}^3}; \quad (13)$$

– для определения необходимой линейной скорости движения ударного элемента при соударении:

$$V' = 21,6 \sqrt{\frac{(\sigma_{дин})^5 (N_{др})^{\frac{5}{3}} \Theta^4}{m_y R_{нр}^3}}. \quad (14)$$

Использование данных зависимостей позволяет обосновать основные параметры процесса дробления материала в ударных мельницах и дробилках.

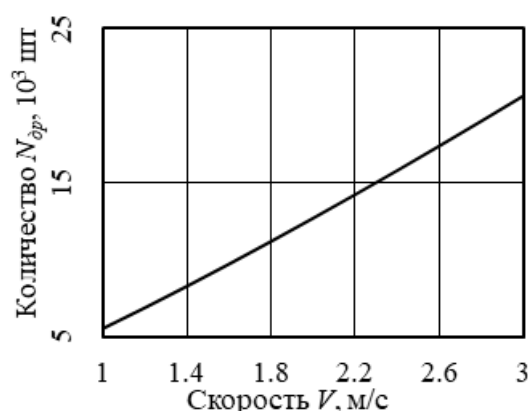


Рисунок 4 График зависимости количества дробинок, раскалываемых одиночным ударом, от скорости

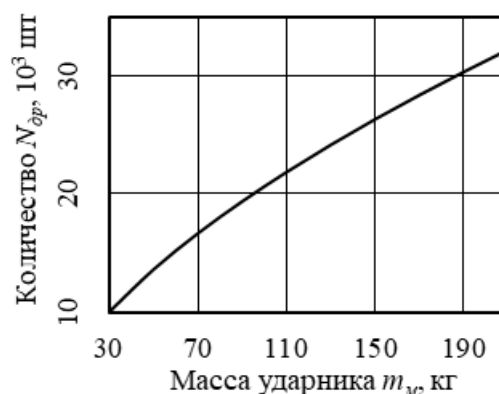


Рисунок 5 График зависимости количества дробинок, раскалываемых одиночным ударом, от массы

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В ходе исследований определены зависимости количества дробинок, раскалываемых одиночным ударом, от массы ударного элемента и его скорости. Предложены аналитические формулы для обоснования массы ударного элемента и его скорости для обеспечения условий раскалывания определённого количества металлической дроби при стеснённом ударе.

Выявлено влияние данных параметров на эффективность процесса раскалывания дроби центральным упругим стеснённым ударом.

Перспективным направлением исследования процесса раскалывания дробы в роторных мельницах ударного действия является изучение процесса соударения ударного элемента с материалом с целью определения требуемых энергосиловых и технологических параметров дробильной

машины и конструкционных особенностей её рабочих органов.

В настоящее время такие работы проводятся в Донбасском государственном техническом университете с привязкой к производству стальной колотой дробы в условиях ООО «Завод стальной дробы» в г. Алчевске.

### Библиографический список

1. ГОСТ 11964–81. Дробь чугунная и стальная техническая. Общие технические условия [Текст]. — Введ. 1983-01-01; измен. 1989-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 2005. — 9 с.
2. Павлиненко, О. И. Процесс разрушения стальной дробы центральным стеснённым ударом [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов : материалы 5-й Международной научно-практической конференции. Том 3. — Донецк, 2019. — С. 104–108.
3. Павлиненко, О. И. Перспективы получения колотой стальной дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Новые материалы и перспективные технологии : сборник материалов Четвёртого междисциплинарного научного форума с международным участием. Т. 1. — М. : ООО «Буки Веди», 2018. — С. 629–631.
4. Конструкционные материалы [Текст] : справочник / Б. Н. Арзамасов и др. — М. : Машиностроение, 1990. — 688 с.
5. Глушак, Б. Л. Исследование прочности материалов при динамических нагрузках [Текст] / Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, С. А. Новиков. — Новосибирск : Наука, 1992. — 295 с.
6. Огородников, В. А. Прочность некоторых марок стали и АРМКО-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2–200 ГПа [Текст] / В. А. Огородников, Е. Ю. Боровкова, С. В. Ерунов // Физика горения и взрыва Т. 40. — Новосибирск : ИСО РАН, 2004. — № 5. — С. 109–117.
7. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. — М. : Наука, 1987. — 246 с.
8. Расчёт на прочность деталей машин [Текст] : справочник / И. А. Биргер и др. — М. : Машиностроение, 1993. — 640 с.

© Павлиненко О. И.

© Власенко Д. А.

© Левченко Э. П.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю.А., д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.*

Статья поступила в редакцию 04.09.19.

### Павліненко О. І., Власенко Д. О., к.т.н. Левченко Е. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР) АНАЛІТИЧНІ ПРИЙОМИ ОБҐРУНТУВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РОЗКОЛЮВАННЯ СТАЛЕВОГО ДРОБУ СТИСНУТИМ УДАРОМ

На підставі контактної теорії ударної взаємодії пружних тіл, запропонованої Герцем, проведено аналітичне дослідження умов руйнування кулястих тіл при ударному контакті і обґрунтовано залежності для визначення основних параметрів процесу розколювання сталевого дробу стиснутим ударом. В результаті запропоновано залежності для визначення необхідних швидкостей зіткнення, діаметрів і мас ударного елемента і дробу для забезпечення умов гарантованого руйнування матеріалу.

**Ключові слова:** стиснутий удар, розколювання, дріб, теорія контактної взаємодії Герца, контактні напруження, швидкість ударної взаємодії, маса ударного елемента.

**Pavlinenko O. I., Vlasenko D. A., PhD in Engineering Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**ANALYTICAL TECHNIQUES OF SUBSTANTIATION OF THE MAIN PROCESS**  
**VARIABLES OF STEEL SHOT CLEAVING BY CONSTRAINED STROKE**

*Having based on the contact theory of impact interaction of elastic bodies, proposed by Hertz, there has been carried out the analytical study of failure conditions of spherical bodies in shock contact and justified the dependence to determine main process variables of steel shot cleaving by constrained stroke. As a result, there has been find out the dependences for determining the necessary impact rate, diameters and masses of the impactor and shot to ensure the conditions of guaranteed material breakage.*

**Key words:** *constrained stroke, cleaving, shot, Hertz theory of contact interaction, contact stress, impact rate, mass of the impactor.*