

ABOUT INFLUENCE OF SPEED WORKING BODIES OF DIGGING MACHINES ON THE RESISTANCE FORCE OF SOIL CUTTING

Abstract. The processes occurring during high-speed cutting of soil are considered. The dependence of the resistance force of soil cutting from speed of interaction, taking into account the compressibility of soil and the occurrence of wave drag forces is established. Analytical expressions for calculating the components of the total force of high-speed cutting of soils is given. The dependence of the energy intensity of the cutting process of the speed is analyzed and practical recommendations for the rational choice of cutting speed is given.

Keywords: resistance force of soil cutting, cutting speed, compressibility of soil, compression wave ground, the force of the wave resistance, the power consumption of the cutting process, efficient cutting speed.

REFERENCES

1. Vetrov Yu.A. Rezanie gruntov zemleroynymi mashinami / Yu.A. Vetrov. – M.: Mashinostroenie, 1971. – 357 s.
2. Zelenin A.N. Osnovy razrusheniya gruntov mekhanicheskimi sposobami / A.N. Zelenin. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 376 s.
3. Artemev K.A. Osnovy teorii kopaniya grunta skreperami / K.A. Artemev. – M.: Mashinostroenie, 1963.
4. Nadai A. Plastichnost i razrushenie tverdykh tel. Tom 2 / A. Nadai ; per. s angl. pod red. G.S. Shapiro. – M.: Mir, 1969. – 864 s.
5. Ivanov N.N. Konstruirovaniye i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd / N.N. Ivanov, Ya.I. Kaluzhskiy, M.B. Korsunskiy [i dr.]. – M.: Transport, 1973. – 328 s.
6. Landau L.D. Teoreticheskaya fizika. Tom 6. Gidrodinamika / L.D. Landau, E.M. Lifshits. – 3-e izd., pererab. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. – 736 s.
7. Stanevskiy V.P. O fizicheskoy suschnosti vliyaniya skorosti na silu rezaniya gruntov // Gornyye, stroitelnyye i dorozhnyye mashiny :

sbornik. Vyip. 4 / V.P. Stanevskiy. – Kiev.: Tehnika, 1966. S. 46-51.

8. Fomichev V.P. Metodika rascheta optimalnykh rezhimov raboty transheynnykh ekskavatorov / V.P. Fomichev. – Rostov-na-Donu.: RISI, 1971. – 118 s.

9. Alekseeva T.V. Dorozhnyie mashiny. Chast 1. Mashiny dlya zemlyanykh rabot / T.V. Alekseeva, K.A. Artemev, A.A. Bromberg [i dr.]. – 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 504 s.

Семкин Дмитрий Сергеевич (Россия, г. Омск) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» ФГБОУ ВО «СиБАДИ». (644080, Россия, г. Омск, пр. Мира 5, e-mail: D.S.Semkin@yandex.ru).

Semkin Dmitry Sergeevich (Russia, Omsk) – candidate of technical Sciences, docent of the department «Technique for construction and service of oil and gas complexes and infrastructures», «The Siberian Automobile and Highway University (SibADI)». (644080, Russia, Omsk, Mira prospect 5, e-mail: D.S.Semkin@yandex.ru).

УДК 539-531

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МАКСИМАЛЬНЫХ СИЛ И УСКОРЕНИЙ ПРИ УДАРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Б.Н.Стихановский¹, Л.М.Стихановская²

¹Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), Россия, г. Омск;

²ФБГОУ ВО «СибАДИ» Россия, г. Омск.

Аннотация. В статье рассматривается проблема определения максимальных сил при ударном взаимодействии твердых тел в случае упругих, пластических деформаций контак-

ных поверхностей и при ударе по консоли с прямоугольным и круглым поперечным сечением. Определены максимальные деформации в центре контактной зоны при соударении тел из одинаковых и разных материалов. Установлены количественные зависимости между отдельными параметрами удара для получения максимальных ударных сил. Приведен пример практического применения теоретических зависимостей при создании ударного копра с высокими скоростями взаимодействия бойка с испытуемым объектом.

Ключевые слова: ударное взаимодействие, высокая скорость, упругие и пластические деформации, максимальная сила, копер для ударных испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность использования удара твердых тел в технологических процессах является одним из показателей технического уровня ряда отраслей, поэтому исследованию таких взаимодействий посвящено множество публикаций [1],[2],[3].

Решение вопросов теории передачи энергии удара, определение импульсов сил, напряжений, ускорений, коэффициентов восстановления и отскока является основой для создания современных высокопроизводительных машин и устройств, используемых при выполнении горных, строительных и дорожных работ, разработке мерзлого грунта, разбивке негабаритов из бетона и пород, ковке и штамповке металлов и производстве разнообразных технологических операций [4], [5]. Будет рассмотрено взаимодействие твердых тел в двух случаях, когда преобладают упругие или пластические деформации в зоне контакта.

УДАРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Случай 1. Упругие деформации в зоне контакта.

При упругих деформациях в контактной области можно воспользоваться зависимостями Г. Герца. При этом максимальная площадь контакта должна быть много меньше площадей поперечных сечений тел и энергия пластических деформаций значительно меньше энергии упругих, где приведенный радиус контактных поверхностей

$$R_0 < (2-3) d_i,$$

$$\text{где } R_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2},$$

d_i – диаметры поперечных сечений тел $i = 1$ первого и $i=2$ второго тела. По Г.Герцу максимальная сила при ударе

$$F_m = k \cdot \alpha_m^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

$$\text{где } k = \frac{4\sqrt{R_0}}{3\pi(\delta_1 + \delta_2)} = \frac{4E_0}{3}\sqrt{R_0} \quad (2)$$

$$\delta_i = \frac{1 - \mu_i^2}{\pi E_i}, \quad \mu_i - \text{коэффициент Пуассона и } E_i - \text{модули упругости для материалов двух соударяющихся тел.}$$

$$\delta_1 + \delta_2 = \frac{1 - \mu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{\pi E_2} = \frac{1}{\pi E_0}, \quad (3)$$

$$\text{где } E_0 = \frac{E_1 E_2}{E_1(1 - \mu_2^2) + E_2(1 - \mu_1^2)}, \quad (4)$$

При одинаковых материалах:

$$E_1 = E_2 = E, \quad \mu_1 = \mu_2 = \mu,$$

$$E_0 = \frac{E}{2(1 - \mu^2)} \quad (5)$$

$$k = \frac{2E\sqrt{R_0}}{3(1 - \mu^2)}, \quad (6)$$

Максимальная деформация в центре контактной зоны:

$$\alpha_m = \left(\frac{15m_0 V_0^2}{16E_0 \sqrt{R_0}} \right)^{0.4}, \quad (7)$$

$$\text{где } m_0 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (8)$$

Для одинаковых материалов тел:

$$\alpha_m = \left[\frac{15m_0 V_0^2 (1 - \mu^2)}{8E \sqrt{R_0}} \right]^{0,4}, \quad (9)$$

Подставляя (2) и (7) в (1) :

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{4}{3} E_0 \sqrt{R_0} \left(\frac{15m_0 V_0^2}{16E_0 \sqrt{R_0}} \right)^{0,6} = \\ &= \frac{4}{3} E_0^{0,4} R_0^{0,2} \left(\frac{15}{16} \right)^{0,6} V_0^{1,2} \\ &\approx 1,2827 (R_0 E_0^2 m_0^3 V_0^6)^{0,2} \approx \\ &\approx 1,2827 R_0^{0,2} E_0^{0,4} m_0^{0,6} V_0^{1,2} \end{aligned} \quad (10)$$

Для одинаковых материалов :

$$F_m = 0,972 R_0^{0,2} \left(\frac{E}{1 - \mu^2} \right)^{0,4} m_0^{0,6} V_0^{1,2}, \quad (11)$$

Для стальных тел $\mu \approx 0,3$;

$$\begin{aligned} E &= 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2; \\ F_m &= 33445 (R_0 m_0^3 V_0^6)^{0,2}, \end{aligned} \quad (12)$$

Например, при ударе $m_1 = m_2 = 0,5$ кг со скоростью $V_0 = 10$ м/с и $R_0 = 0,1$ м имеем: $m_0 = 0,25$ кг и максимальную силу удара $F_m \approx 145 \text{ кН}$.

Случай 2. Пластические деформации в контактной зоне

Максимальная сила при ударе m_1 по неподвижной m_2 (или m_2 по неподвижной m_1) со скоростью V_0 равна:

$$F_m = \frac{m_2 V_0 \sqrt{2\pi R_0} H_v m_1}{m_1 + m_2}, \quad (13)$$

где за первое выбираем тело с меньшей массой, т.е. $m_1 \leq m_2$; H_v – твердость материала в зоне контакта – меньшая из двух взаимодействующих поверхностей, т.е. которая в первую очередь деформируется, размерность в Паска-

лях, Н м^{-2} ; Формула (13) получена с учетом коэффициента полезного действия передачи внутренней энергии при ударе, когда коэффициент восстановления равен нулю, [1, с. 83], и максимальной силы при ударе по преграде, [6, с.208].

Приближенно:

$$F_m = \frac{2,5mV_0}{1+m} \sqrt{R_0 H_v m_1}, \quad (14)$$

$$\text{где } m = \frac{m_2}{m_1}.$$

Рассмотрим предыдущий пример и предположим, что твердость по Бринелю и Виккерсу:

$$H_B \approx H_v = 200 \text{ кгс/мм}^2 \approx 2 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2,$$

тогда

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{2,5 \cdot 10}{2} \sqrt{0,1 \cdot 2 \cdot 10^9 \cdot 0,5} = \\ &= 1,25 \cdot 10^5 = 125 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Случай 3. Удар по консоли длиной ℓ , имеющей момент инерции площади поперечного сечения I и модуль упругости E .

Для прямоугольного поперечного сечения консоли $I = \frac{bh^3}{12}$, где b – ширина, а h – высота сечения, для круглого сечения $I = \frac{\pi d^4}{64}$, к.п.д.

передачи внутренней энергии при неподвижном до удара одного из тел, [6] :

$$\eta_{en} = \frac{m}{m+1}, \text{ т.е. энергия, идущая на}$$

деформацию консоли, равна :

$$E_{en} = \frac{mm_1 V_0^2}{2(m+1)} = \frac{m_0 V_0^2}{2}.$$

$$E_{def} = \frac{F_m y}{2},$$

Энергия деформаций равна: где y – максимальная деформация в точке

удара. У консоли длиной ℓ : $y = \frac{F_m \ell^3}{3EI}$. Приравняв $E_{\text{вн}}$ к $E_{\text{деф}}$, получим:

$$m_0 V_0^2 = \frac{F_m^2 \ell^3}{3EI},$$

откуда:

$$F_m = \frac{V_0}{\ell} \sqrt{\frac{m_0 3EI}{\ell}} \quad (15)$$

Пусть $\ell = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$; сечение круглое $d = 10 \text{ мм}$, т.е. $I = \frac{3,14 \cdot 10^4}{64} = 491 \text{ мм}^4 =$

$= 491 \cdot 10^{-12} \text{ м}^4$; стержень консоли стальной,

т.е. $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $V_0 = 10 \text{ м/с}$,

$m_1 = m_2 = 0,5 \text{ кг}$, т.е. $m_0 = 0,25 \text{ кг}$, тогда

$$F_m = \frac{10}{0,04} \sqrt{\frac{0,25 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 491 \cdot 10^{-12}}{0,04}} \approx 10,73 \text{ кН}.$$

Как видно из (10 - 12) и (13 - 14), у максимальной силы и соответственно у максимального

ускорения центров масс $a_{mi} = \frac{F_m}{m}$ имеем наибольший показатель степени у скорости

удара V_0 . И если увеличение твердости ограничено пределами прочности материала и закалкой бойка, а размер приведенного радиуса

R_0 нельзя брать большим из-за снижения центральности удара, [6], то величину скорости

V_0 можно увеличивать в десятки и сотни раз. Одним из способов увеличения скорости удара является использование ротационного разгонного механизма, что позволяет, например, достигать скорости $V_0 = 40 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ при габаритах в сотни раз меньших, чем размеры вертикального копра со свободно падающим бойком, в котором для достижения этой же скорости необходима высота падения не менее

$$H = \frac{V_0^2}{2g} = 80 \text{ м}, \text{ где } g = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Обычно копры применяются в испытательной технике на перегрузки различных изделий при ударах. Одним из последних достижений в

этой области является копер для ударных испытаний, [7].

Копер содержит корпус 1 и ротор 2, на периферии которого размещены держатели, выполненные в виде колец со сферической внутренней поверхностью. В кольцах вставлены бойки в виде шаров. Один шар закреплен в держателе без возможности выхода из него, а второй шар имеет возможность выхода из держателя и связан через держатель со штоком. Величина хода штока такая, что исключается контакт держателя с желобом, расположенным в секторе торможения ротора диаметрально противоположно сектору выхода второго шара в конус. Вне зоны торможения участок выполнен в виде направляющей без заклинивания и торможения держателей и шаров, между конусом и тормозным участком расположен прямой участок желоба. С корпусом связаны конусный ствол 5, ось которого расположена по касательной к траектории бойка. На срезе конусного ствола установлен узел крепления испытуемого объекта 6. Привод осевого перемещения и радиальные каналы через окна связаны со штоками и кольцами, а пальцы, входящие в момент разгона ротора и выходящие из фиксатора держателей – с гнездами. Тормозное устройство выполнено в виде желоба с углом конусности 2α , рис.1.

Перед испытанием на копре привод отключен, а пальцы держателей заходят в гнезда фиксатора. При этом штоки входят внутрь радиальных каналов ротора так, что кольца при вращении ротора не задевают стенок тормозных устройств. По достижении заданной скорости вращения ротора включается привод осевого перемещения, который поднимает фиксатор. Пальцы освобождаются и штоки с кольцами и бойками под действием центробежных сил движутся к периферии ротора, где один боек производит удар по испытуемому объекту. Торможение одного кольца со связанным бойком-шаром происходит в желобе тормозного устройства. При этом путь торможения значительно уменьшается по сравнению с гладкой тормозной поверхностью, так как кольца зажимаются в конусе желоба, при этом приведенное трение $F_{\text{пр}}$ больше, чем на

плоскости, то есть $F_{\text{пр}} = \frac{F}{\sin \alpha}$, где α угол

конусности желоба. Например, при $\alpha = 30^\circ$ имеем $F_{\text{пр}} = 2F$, где F – сила трения-скольжения кольца по плоскости.

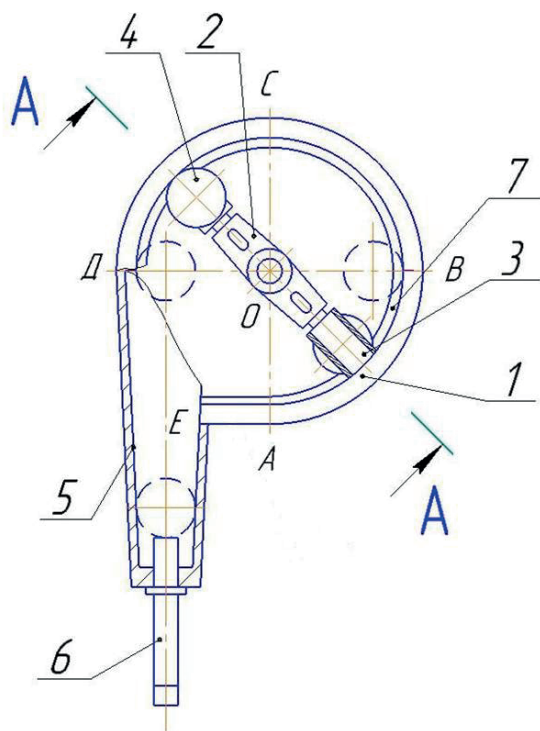


Рис. 1. - Копер
1 - корпус; 2 - ротор; 3 - держатель; 4 - боек;
5 - конусный ствол; 6 - испытуемый объект; 7 - жёлоб.

Кроме этого, удар держателя кольца в конусе тормозного устройства вызывает отскок значительно меньший, чем от гладкой поверхности корпуса, что приводит к большей стабильности выхода бойка из кольца, точности попадания в ствол и уменьшает разброс результатов испытаний на копере для ударных испытаний. Один из шаров 4 закреплён в держателе и не вылетает из держателя при его торможении в жёлобе. При этом сила торможения передаётся через ротор 2 на другой шар, который вылетает и попадает в конус 5, а затем ударяет в испытуемое изделие 6. Следовательно, тормозится всегда только держатель с закреплённым шаром. Оба штока в процессе разгона ротора давят равномерно одинаковыми и противоположно направленными центробежными силами на пальцы, а при срабатывании привода из-за малого хода штока держателя свободного шара может тормозиться лишь шток, держатель и связанный с ним шар, т.к. он выходит в направляющей на небольшой ход, достаточный для прижатия в жёлобе.

Прямой участок желоба необходим для плавного входа держателя со связанным шаром в зону торможения жёлоба, что исключает удар держателя при входе в тормозную зону.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены зависимости максимальной силы и ускорения от скорости удара, геометрических характеристик и материалов соударяющихся тел при упругих и пластических деформациях в контактной зоне, практическое применение которых нашло отражение при создании копра для ударных испытаний. Предлагаемая конструкция копра имеет один конусный ствол и один узел крепления испытуемого объекта вместо двух в существующих копрах. Кроме этого, исключён вероятный удар держателей при входе в начальную зону торможения криволинейного жёлоба в области конусного ствола, что делает конструкцию копра более простой и надёжной, а также уменьшает тормозной путь ротора за счёт увеличения центробежной силы прижатия из-за присоединённой массы шара, жёстко связанного с тормозимым в жёлобе держателем. Такой копер позволяет значительно увеличить скорость удара, достигая максимально возможных ударных сил при заданных параметрах соударяющихся твердых тел.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тарасов, В.Н. Теория удара в теоретической механике и ее приложение в строительстве / В.Н. Тарасов, Г.Н. Бояркин. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 1999. – 120 с.
2. Галдин, Н.С. Оптимизационный синтез основных параметров гидравлических импульсных систем строительных машин / Н.С. Галдин, В.Н. Галдин, Н.Н. Егорова // Вестник СибАДИ. – 2013. – №6 (34). – С.73-77.
3. Щербаков, В.С. Основные показатели гидравлических импульсных систем строительных машин / В.С. Щербаков, В.Н. Галдин // Вестник СибАДИ. – 2013. – №1(29). – С. 47-51.
4. Алимов О.Д. Гидравлические виброударные системы / О.Д. Алимов, С.А. Басов. – М. : Наука, 1990. – 352 с.
5. А. с. 1045041 СССР, G 01 M 7/ 00. Устройство для ударных испытаний изделий / Б.Н. Стихановский – №3448940/25-28 ; заявл.08.06.82; опубл. 30.09.83, Бюл.№36.-3с.
6. Стихановский, Б.Н. Процессы удара : монография / Б.Н. Стихановский. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. 324 с.
7. Пат. 163315 Российская Федерация. G 01 M 7/ 00 Копер для ударных испытаний / Б.Н. Стихановский, Е.С. Чернова. Опубл.10.06.2016. Бюл.№16.

