

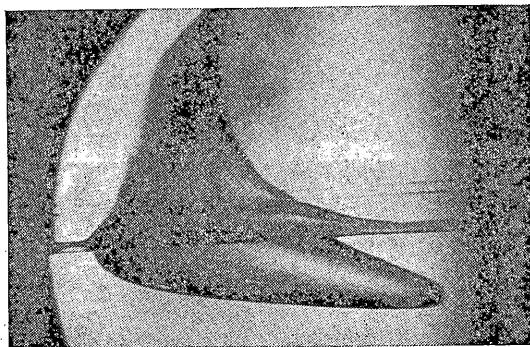
КОСОЙ УДАР ТВЕРДОГО ТЕЛА О ГРУНТ ИЛИ ВОДУ

Приведены результаты экспериментального исследования косоугольного входа в воду и грунтовую среду шара, конуса и диска. Исследуется явление рикошета и проникание. Устанавливается связь между критическим углом, разделяющим рикошетирующие и нерикошетирующие углы входа, и преломлением траектории при проникании. Преломление характеризуется отношением косинусов углов наклона траектории движения тела к поверхности среды до и после ее прохождения. Устанавливается зависимость этих параметров от прочности среды, скорости входа, массы тела и его геометрии. Выясняется связь между критическими углами входа и коэффициентами лобового сопротивления рассматриваемых тел.

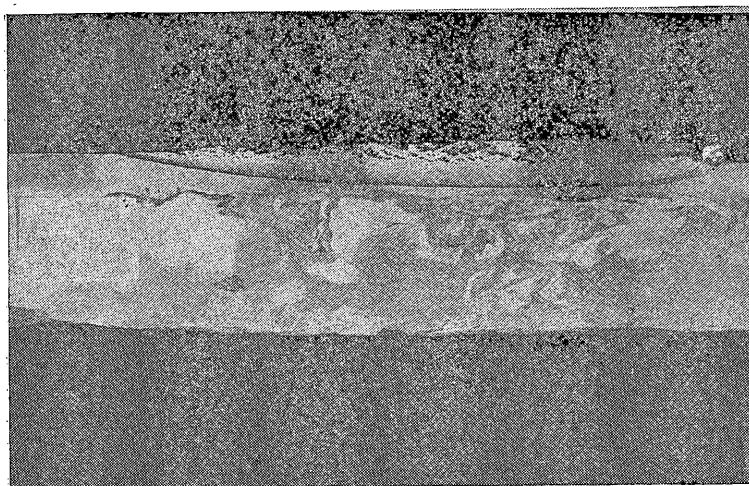
При изучении соударения твердого тела с деформируемой средой, когда вектор скорости тела не совпадает с нормалью к поверхности среды (косой удар), обычно ограничиваются определением условий рикошетирования. При этом рассматривается начальный участок траектории движения тела в среде, на котором сказывается влияние свободной поверхности. Наиболее подробно исследован рикошет шара от поверхности воды [1-3]. Получено хорошее совпадение теоретических и экспериментальных значений критического угла θ_c , делящего углы наклона вектора скорости к поверхности воды на значения, при которых происходит или не происходит рикошет. Теория дает следующее выражение для θ_c

$$\theta_c^2 = (10\sigma)^{-1} - 4/F \quad (1)$$

где σ — отношение плотностей материала сферы и жидкости, $F = v_0^2/rg$ — число Фруда, v_0 — скорость соударения, r — радиус сферы, g — ускорение свободного падения. Это соотношение показывает, что чем больше скорость входа в воду, тем больше критический угол. Однако влияние числа Фруда для стального шара диаметром



Фиг. 1



Фиг. 2

1 см становится очень малым уже при скорости 50 м/с и θ_c практически не зависит от скорости. Это нашло экспериментальное подтверждение в диапазоне скоростей 10–150 м/с [2].

Для песчаной среды теоретический анализ проводится по аналогии с исследованием водяного рикошета с добавлением к гидродинамическим силам постоянной силы, учитывающей прочность песка на сжатие [4–5]. Тогда получается, что в отсутствие сил тяжести, критический угол входа с ростом скорости соударения убывает, что нашло качественное подтверждение в опытах [2].

В экспериментах, описанных ниже, для шара определяются значение θ_c при входе в воду, песок и пластилин со скоростями в диапазоне 100–900 м/с. В случае отсутствия рикошета установлено преломление траектории и определена связь между θ_c и коэффициентом преломления. Для диска и конуса с углом раствора 90° , имеющих ту же массу, что и стальной шар, найдены критические углы входа в пластилин и воду. Обсуждается зависимость θ_c от коэффициента лобового сопротивления этих тел.

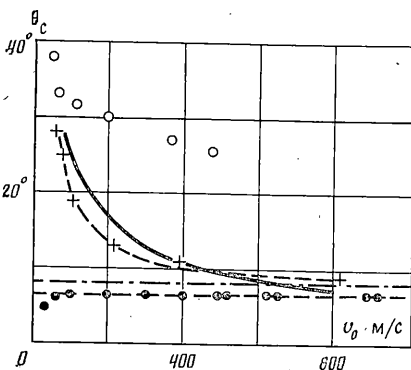
В опытах для разгона метаемого тела использовалась одноступенчатая газовая пушка, описанная в [6]. Скорость соударения определялась с точностью 1% по времени пролета телом расстояния между двумя световыми лучами, проходящими через ось стрельбы и падающими на фотодиоды. Наклон оси ствола к горизонту устанавливается с точностью $15'$. В случае опытов с водой это было погрешностью определения угла падения. В опытах с пластилином и песком поверхность среды устанавливалась горизонтально с точностью $10'$. Температура пластилина выдерживалась в пределах $22,5 \pm 0,5^\circ \text{C}$. Он формировался в виде блока толщиной 140 мм, шириной 300 мм, длиной 500 мм. Пресс для формовки имел шлифованные поверхности рабочих плит. Этим определялось состояние поверхности пластилина. Песок использовался кварцевый, воздушной влажности, плотность 1,64 г/см³, максимальное зерно проходит через сито с ячейкой 0,63 мм. Контейнер для песка имел длину 800 мм, глубину и ширину 300 мм. Верхняя поверхность песка укатывалась стальным катком движением вдоль граней 800 мм. До скорости 400 м/с использовались стальные и дюралевые шарики диаметром 10 мм, массой 4,06 и 1,45 г соответственно; при большей скорости — шарики диаметром 4,75 мм, массой 0,43 г, которые разгонялись в той же установке в цилиндрическом поддоне из дерева или пенопласта. Поддон улавливался на выходе из ствола. Шарики обоих диаметров двигались поступательно. Проявления масштабного фактора в пределах точности эксперимента нет. Это установлено в экспериментах с шариками обоих диаметров при стрельбе с одинаковыми скоростями.

Критический угол θ_c для воды и пластилина определялся, как наклон вектора скорости тела в момент удара, при котором шар в среде движется большую часть пути параллельно свободной поверхности. Для воды это устанавливалось с помощью скоростной киносъемки процесса входа, для пластилина — по остаточной каверне (фиг. 1, 2). Для песка θ_c определялся как угол, при котором шарик останавливался на выходе из каверны. Уменьшение угла падения на $0,5^\circ$ в случае воды и пластилина приводит к явному рикошету и уменьшению пути взаимодействия шарика со средой.

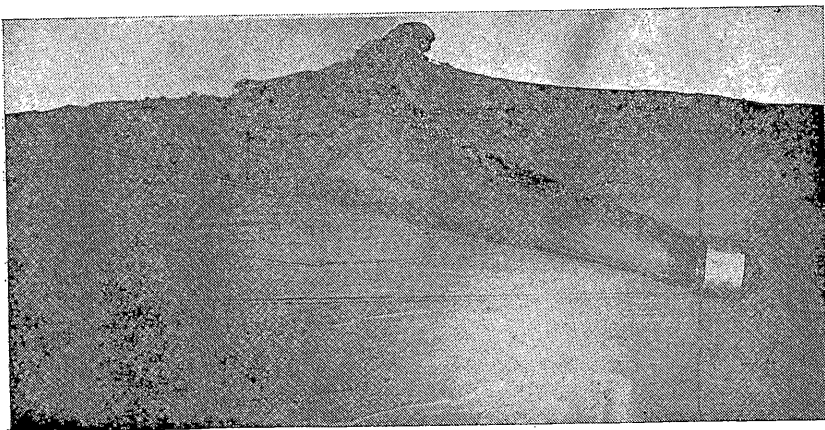
Опыты с песком имеют особенность, которая состоит в том, что если начинать с больших углов входа, когда нет рикошета, и после каждого эксперимента не перемешивать весь песок, а засыпав образовавшуюся лунку, утрамбовать песок и выровнять поверхность для следующего опыта с меньшим углом падения, то θ_c окажется заметно меньше, чем при той же подготовке песка. В серии экспериментов, начинающихся со стрельбы под углом, приводящим к рикошету с постепенным его увеличением, пока не получится проникание. Различие в обоих случаях может составить 5° . Если же после каждого опыта песок перемешивать на достаточную глубину и только после этого утрамбовывать и выравнивать, то при проведении экспериментов в любой последовательности можно точность в определении θ_c довести до $1\text{--}2^\circ$. Именно так полученные результаты в дальнейшем рассматриваются.

Необычность поведения песка можно объяснить так. Если после очередного опыта образовавшиеся в песке поля деформаций и напряжений не нарушаются, то они облегчают повторение движения, и это затягивает тело в русло движения предыдущего опыта.

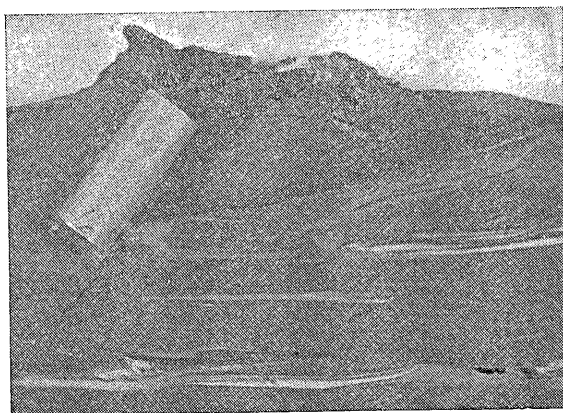
Аналогичный эффект наблюдается при стрельбе по нормали к поверхности песка. Например, если при одной и той же скорости соударения проводить подряд несколько экспериментов и после каждого песок не перекапывать, а засыпав образовавшуюся лунку и утрамбовав его, проводить следующий выстрел, то при первых 6–7 опытах глубина проникания будет каждый раз возрастать, затем стабилизируется, но будет больше средней глубины проникания в серии выстрелов, в которых после каждого эксперимента весь песок в контейнере формируется заново, т. е.



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

песок обладает своего рода «памятью», и это надо учитывать при проведении и интерпретации опытов с ним.

На фиг. 3 обобщены результаты по рикошету стального шарика от воды, пластилина и песка. Ось ординат указывает значение θ_c в градусах, ось абсцисс — скорость шарика перед соударением v_0 в м/с. Точками отмечены данные для воды, кружочками — для песка, крестиками — для пластилина. Горизонтальная штриховая линия — значение θ_c , вычисленное по Биркгофу (выражение (1) без числа Фруда). Штрихпунктирная линия — θ_c , вычисленное так же, но σ определено как отношение плотности стали к плотности пластилина.

Для воды при v_0 от 100 м/с вплоть до 900 м/с соблюдается независимость θ_c от v_0 , при этом θ_c равно величине, вычисленной по Биркгофу.

Для пластилина θ_c быстро убывает с увеличением v_0 до 400 м/с. Затем вплоть до 800 м/с θ_c уменьшается всего на полградуса примерно и остается большим θ_c , определенного для пластилина, как для жидкости.

В [7] показано, что при косом входе в пластилин со скоростью до 400 м/с зависимость θ_c от v_0 можно описать соотношением $\cos \theta_c = 1 - v_1/v_0$, где v_1 — параметр размерности скорости, который трактовался как наибольшая скорость нормального удара, при которой происходит отскок, а при скоростях, больших v_1 , будет проникание без отскока. При температуре 23°С для партии пластилина, используемой в опытах, эта скорость оказалась равной примерно 7 м/с. При таком значении v_1 зависимость θ_c от v_0 построена на фиг. 3 сплошной линией. До 600 м/с расхождение между экспериментальными значениями θ_c и определенными через v_1 небольшое, но при больших скоростях оно возрастает, так как по приведенному расчету при $v_0 \rightarrow \infty$, $\theta_c \rightarrow 0$. В действительности θ_c с увеличением v_0 стремится к значению, вычисленному по Биркгофу.

Для песка при скорости входа $< 100-120$ м/с θ_c быстро уменьшается с увеличением v_0 . Затем идет медленное убывание. При скорости входа 450 м/с θ_c для песка остается почти в три раза больше, чем θ_c , определенное для жидкости с плотностью песка. Для стального шарика это значение $\theta_c = 8^\circ 15'$.

Приведенные результаты показывают, что рикошет шара от свободной поверхности среды определяется в основном следующими параметрами: удельной плотностью и прочностью среды, её сжимаемостью, удельной плотностью материала

шара, его скоростью в момент удара, ускорением силы тяжести. Если рикошет характеризовать углом, то можно представить зависимость его от безразмерных комбинаций отмеченных параметров в виде $\theta_c = f(\sigma, F, \tau/\rho v_0^2, c/v_0)$, где τ — параметр размерности напряжения, характеризующий прочность среды, ρ — плотность среды, c — скорость звука в ней. В опытах с водой установлено, что при $v_0 > 60$ м/с влиянием числа Фруда на рикошет стального шара можно пренебречь. Если не учитывать сжимаемость, то $\theta_c = f(\sigma, \tau/\rho v_0^2)$.

При $\tau = 0$ θ_c равно критическому углу рикошета от воды. Тогда возможно представление

$$\theta_c = (10\sigma)^{-1/2} + f_2(\tau/\rho v_0^2)$$

Обработка экспериментальных результатов для пластилина показала, что если f_2 представить в виде $\tau/\rho v_0^2$, то τ довольно точно описывается выражением $\tau = a + b v_0$. Тогда

$$\theta_c = (10\sigma)^{-1/2} + b/\rho v_0 + a/\rho v_0^2$$

Зависимость θ_c от v_0 в этом виде показана на фиг. 3 штриховой кривой. Величины a и b таковы, что при $v_0 > 200$ м/с последним слагаемым при вычислении θ_c можно пренебречь.

Аналогичная обработка опытных данных для песка приводит к зависимости

$$\theta_c = (10\sigma)^{-1/2} + n\rho^{-1}v_0^{-0,25}$$

Опыты по наклонному входу в воду и рикошету от её поверхности показали, что, как и в случае пластилина [7], имеется связь между этими двумя процессами. При входе в воду происходит преломление траектории движения шарика. После удаления от поверхности воды на 1,5–2 диаметра движение становится вновь прямолинейным, однако наклон линии движения к поверхности воды становится меньше. Отношение косинусов углов наклона траектории движения шара до и после прохождения поверхности (в оптике — коэффициент преломления K) зависит от массы шара и не зависит от скорости входа в исследованном диапазоне скоростей. Проникание перейдет в рикошет, если косинус угла наклона траектории движения в воздухе станет больше K , т. е. критический угол определяется равенством $\cos \theta_c = K$, что подтверждается опытом. Действительно, критерием перехода проникания в рикошет можно считать условие, при котором тело, пересекая границу, приобретает движение, параллельное ей.

Опыты с наклонным входом в воду конуса с углом раствора 90° , диаметром основания 10 мм и цилиндра того же диаметра, движущихся вдоль оси симметрии без заметного угла атаки и имеющих тот же вес 4 г, что и стальной шарик диаметром 10 мм, показали, что отношение критических углов рикошета для них примерно соответствует отношению гидродинамических коэффициентов сопротивления C_x . Так для цилиндра $\theta_c = 18^\circ$, для конуса $\theta_c = 11^\circ$. При нулевом числе кавитации для сферы $C_x = 0,27$, для конуса $C_x = 0,46$, для диска $C_x = 0,8$. Отношение коэффициентов сопротивления конуса и диска к коэффициенту сопротивления сферы умноженное на θ_c сферы дает почти совпадающее с опытным значение θ_c соответствующих тел. В принципе θ_c диска и конуса может зависеть от положения центра тяжести, поперечного момента инерции тела, так как развитие рикошета происходит с возникновением значительного поперечного вращения. Цилиндр имел удлинение 2. В процессе погружения он сильно опрокидывается вперед. Это происходит не только при углах входа, приводящих к рикошету, но и при более крутом входе. Конус вместе с цилиндрической частью имел удлинение 1,5. В этом случае при косом входе он опрокидывается назад. Такое различие можно объяснить тем, что в случае цилиндра-диска эпюра нормальных давлений на диск неравномерная: давление снизу больше. Вертикальный поток, возникающий из-за подъема свободной поверхности, не создает заметных касательных усилий на диске. В случае конуса эпюра давлений вдоль оси должна иметь такой же характер (давление снизу больше), но поперечный поток, возникающий из-за подъема свободной поверхности, создает на конусе обратный момент по отношению к моменту от осевых сил, который в данном случае оказался больше, что привело к опрокидыванию назад.

Та же картина наблюдается при входе конуса и диска-цилиндра в пластилин (фиг. 4, 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson W., Reid S. R. Ricochet of spheres off water // J. Mech. Eng. Sci. 1975. V. 17. № 2. P. 74–81.
2. Soliman A. S., Reid S. R., Johnson W. The effect of spherical projectile speed in ricochet of water and sand // Intern. J. Mech. Sci. 1976. V. 18. № 6. P. 279–284.

3. *Hutchings I. M.* The ricochet of spheres and cylinders from the surface of water // Intern. J. Mech. Sci. 1976. V. 18. № 5. P. 243-247.
4. *Bai Y. L., Johnson W.* The effect of projectile speed and medium resistance in ricochet off sand // J. Mech. Eng. Sci. 1981. V. 23. № 2. P. 69-75.
5. *Daneshi G. H., Johnson W.* The ricochet of spherical projectiles off sand // Intern. J. Mech. Sci. 1977. V. 19. № 8. P. 491-497.
6. *Бивин Ю. К., Викторов В. В., Чурсин А. С.* Пневматическое устройство для скоростного метания тел // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Горький. Изд-е Горьк. ун-та. Вып. 9. С. 140-145.
7. *Бивин Ю. К.* Изменение направления движения твердого тела на границе раздела сред // Изв. АН СССР. МТТ. 1981. № 4. С. 105-109.

Москва

Поступила в редакцию
12.V.1988