

УДК 539.374

© 1993 г. Ю. К. БИВИН

КОСОЙ ВХОД ГРУППЫ ТЕЛ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Приведены результаты экспериментального исследования косою входа по инерции в упругопластическую среду группы не связанных между собой твердых тел. Процесс изучался при двух вариантах расположения тел до соударения: гуськом с центрами масс по линии вектора скорости соударения; послойного, когда каждый слой располагался в плоскости, нормальной к вектору скорости. Выявлено существенное различие между углами падения, когда все тела рикошетируют и когда они все проникают. Различие между этими углами зависит от числа тел, их расположения и расстояния между ними до удара. Критический угол для одного тела, разделяющий углы входа, при которых происходит или не происходит рикошет, лежит между углами рикошета и проникания всей группы тел при той же скорости соударения.

1. Косой вход твердого сферического тела в воду и грунтовую среду довольно подробно изучен [1—7]. Получено хорошее совпадение расчетных и экспериментальных критических углов входа в воду. Для грунтовых сред на основании эксперимента и теоретических результатов для воды получены полуэмпирические соотношения для критических углов, в которых отражена их зависимость от скорости входа, отношения плотностей тела и среды, от ее прочностных характеристик. Попытки изменить критический угол при неизменных указанных параметрах привели к идее задавать вращение проникающему телу. Можно представить случай, когда требуется, чтобы одновременно было и проникание, и рикошет. Эксперименты показали, что этого можно добиться, если тело состоит из отдельных легко разделяющихся частей.

Исследования проводились в основном со стальными шариками. Несколько экспериментов проведено с цилиндром. Разгон тел осуществляется на пневмопушке. Скорость соударения определялась с помощью фотодиодов, установленных по оси стрельбы на расстоянии 100 мм друг от друга. Сигнал с фотодиодов после прохождения преобразовательного блока поступал на частотомер и осциллограф. По их показаниям определялась скорость и расстояние между телами до входа в среду.

В случае стрельбы телами, расположенными гуськом, они имели диаметр 10 мм, равный диаметру ствола пневмопушки. При послойном расположении шариками диаметром 2,75 заполнялся деревянный стаканчик. В каждом слое было 7 шариков (один — по оси, остальные — вокруг). Внутренний диаметр стаканчика был таким, что шарики в слое лежали плотно.

В качестве рабочей среды использовался пластилин, выдержанный при температуре $20^\circ \pm 0,5^\circ \text{C}$ не менее четырех часов. При этом он становится однородным и нет существенных разбросов в результатах экспериментов. Пластилин формовался в виде прямоугольного блока толщиной 100 мм, размерами в плане 220×355 мм. Верхняя его поверхность выставлялась горизонтально с точностью $\sim 10'$. Ствол пневмопушки устанавливался под углом к горизонту с точностью $\sim 15'$.

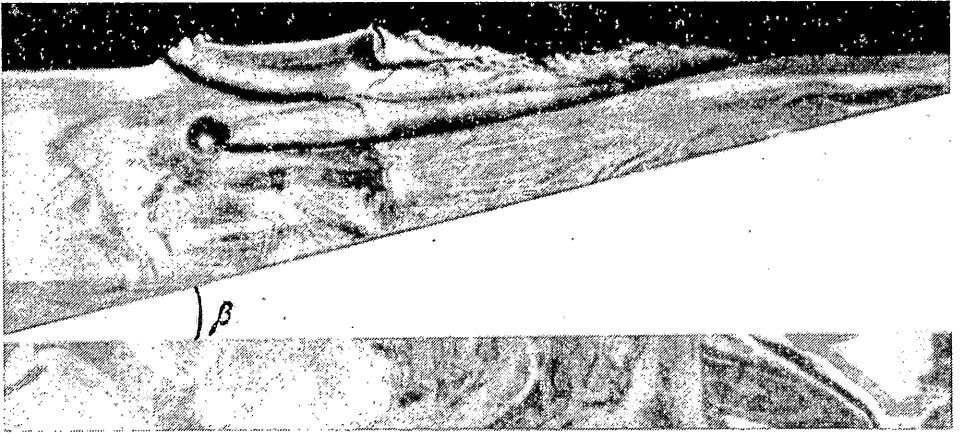
При скорости входа 250 м/с критический угол входа стального шарика в пластилин, отсчитываемый от горизонта, составляет 12° . Если при тех же условиях в пластилин входят гуськом два шарика, то рикошетирует один первый. Это же происходит при угле входа β в пределах $9^\circ < \beta \leq 13^\circ$. Нет рикошета у обоих при $\beta \geq 14^\circ$, оба рикошетируют при $\beta < 9^\circ$. В случае трех шариков рикошет

может происходить одного, двух и трех шариков. Один рикошетирует при $9^\circ \leq \beta \leq 14^\circ$, два — при $7^\circ < \beta < 9^\circ$, все три — при $\beta \leq 7^\circ$. При $\beta > 15^\circ$ все проникают в среду. При косом входе четырех шариков один рикошетирует при $9^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$, два — при $7^\circ < \beta \leq 9^\circ$, все три — $\beta \leq 7^\circ$, нет рикошета при $\beta > 16^\circ$. Рикошет трех шариков не удалось получить. Очевидно, на рикошет первого шарика главным образом влияет второй. На рикошет двух шариков третий оказывает гораздо меньшее влияние, а четвертый в развитии рикошета роли фактически не играет. Следует отметить еще, что чем больше шариков, тем более размыты границы углов, при которых рикошетирует определенное количество шариков. Указанные границы отмечают преимущественное событие.

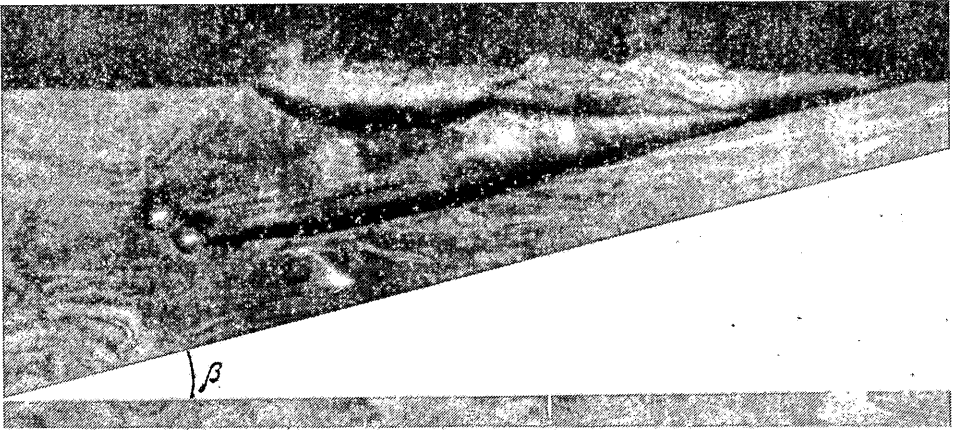
Такой результат можно объяснить следующим образом. Шарики при разгоне расходились на расстояние до 10 мм на воздушном участке полета. Поэтому на начальном этапе погружения в среду они двигались, не взаимодействуя. У первого шарика при прохождении поверхности раздела сред происходило преломление траектории к свободной поверхности пластилина, он терял скорость. Его догонял уже в каверне второй шарик и подбивал снизу к выходу из среды, получая сам импульс вглубь среды. В результате у первого шарика расширяется диапазон углов рикошета с 12° до 13° , у второго траектория меньше преломляется и, чтобы произошел рикошет и его, необходимо, чтобы угол входа обоих шариков не превосходил 9° . В этом случае импульс, который он получает от столкновения с первым шариком, уже недостаточен, чтобы исправить преломление его траектории к рикошету. Если за вторым шариком движется третий, то между ними происходит более прямое столкновение, меньше влияющее на рикошет. Еще более близкое к прямому происходит столкновение между последующими шариками.

При косом входе нескольких сфер, движущихся гуськом, кроме указанных выше, для одной сферы, параметров появляется еще один, влияющий на рикошет — расстояние между сферами на воздушном участке движения. Его роль проясняется из сравнения результатов проникания, когда оно меняется от долей диаметра шара до бесконечности. В последнем случае эксперимент проводился отдельно для каждого шарика, т. е. так, что в начале выстреливался один шарик, а затем в ту же каверну, ничего не меняя, выстреливался второй. Результат таков, что если при совместном движении оба рикошетируют при $\beta < 9^\circ$, то при раздельном входе — при $\beta < 12^\circ$. То есть, если рикошетирует первый, то рикошетирует и второй, значит в данной ситуации совместный вход снижает критический угол входа на 3° (25%). С другой стороны, оба шарика внедряются при совместном движении при $\beta \geq 14^\circ$, а при раздельном входе при $\beta > 15^\circ$. Промежуточный результат, когда один шарик остается в среде, при совместном входе имеет место при $9^\circ < \beta \leq 13^\circ$, при раздельном в диапазоне — $12^\circ < \beta \leq 14^\circ$. В последнем случае второй шарик выбивает первый, застрявший в среде, а сам уходит вглубь.

В случае стрельбы в каверну, образовавшуюся от входа такого же шарика с тем же углом к поверхности и той же скоростью, не превосходящей 300 м/с, касание пластилина вторым шариком происходит в самом начале каверны. Этого не происходит при более высоких скоростях. Например, в эксперименте на скорости 520 м/с. У дюралевого шарика критический угол рикошета от пластилина при $t = 22,5^\circ \text{ С}$ составляет 14° . При втором выстреле в каверну, образующуюся в этих условиях, шарик впервые касается пластилина на расстоянии 4 калибров от края первой каверны и главное, не рикошетирует, как это имеет место при более низких скоростях. Не происходит рикошет второго шарика от каверны, образованной первым шариком, если им выстрелить в пластилин и под углом 12° , хотя при этом уже есть слегка заметное касание вторым шариком края каверны от первого. Лишь при угле входа обоих шариков 11° рикошетирует и второй, хотя основной его контакт со средой начинается на некотором удалении от края первой каверны. То есть на рикошет второго шарика при раздельном входе в прочную среду, в которой ширина каверны за телом зависит от скорости, влияет эта скорость. Очевидно, наиболее резко это влияние начинает сказываться с того значения скорости, когда за первым шариком



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

образуется настолько широкая каверна, что второй шарик входит в контакт со средой на некотором удалении от входа.

2. Иллюстрацией к проведенному анализу могут служить фотографии, приведенные на фиг. 1—3. Показан разрез по оси стрельбы после эксперимента. Фиг. 1 относится к входу гуськом двух шариков под углом $= 14^\circ$ (один рикошетирует). Фиг. 2 — к входу гуськом трех шариков под углом $= 14^\circ$ (один рикошетирует). Фиг. 3 относится к случаю выбивания первого шарика, проникшего в среду под углом 13° вторым шариком при точно таком же втором выстреле.

Были проведены опыты с составным цилиндрическим телом, состоящим из отдельных цилиндров, диаметром 10 мм, длиной 6,3 мм, весом 4 г, таким же как у стального шарика диаметром 10 мм. Они показали, что при отсутствии расстояния между отдельными частями тела до удара оно при наклонном входе движется как целое. Для него существует одно значение критического угла, зависящее от скорости и общей массы. В условиях проводившихся экспериментов один цилиндр массой 4 г имел критический угол 19° , два — 13° , что соответствует критическому углу сплошного тела. Если до соударения с пластилином между цилиндрами было некоторое расстояние, то возникали условия, когда один цилиндр рикошетирует, а другой нет. Но при этом имел место сильный разброс результатов.

В случае послынного расположения шариков разница между углами, при которых происходит внедрение всех шариков, и углом, при котором все они рикошетируют, значительно увеличивается. Так, например, при 28 шариках (4 слоя по 7 шариков), чтобы все они внедрились, угол входа должен быть больше 45° , а чтобы все рикошетировали — меньше 5° . Скорость входа 250 м/с, температура пластилина $20^\circ \pm 0,5^\circ$ С. В промежутке между этими углами количество рикошетирующих шариков убывает по мере возрастания угла входа. При этом наблюдается значительный разброс результатов при, казалось бы, неизменных условиях входа. Экспериментальные данные для этого типа тел собраны на фиг. 4. Здесь по оси ординат указана доля внедрившихся шариков n , по оси абсцисс величина $\alpha = (\beta - \beta_1)/(\beta_2 - \beta_1)$, где β_1 — угол входа, при котором все шарики рикошетируют, β_2 — угол входа, при котором все шарики внедряются.

Темными точками отмечены результаты для тела, состоящего из 28 шариков, светлыми — из 21, крестиками — из 14. В отмеченных координатах результаты для всех трех тел мало отличаются. Характерно, что почти все экспериментальные точки лежат выше диагонали координатного угла, но близко к ней. Это дает возможность оценить минимальное количество шариков, внедряющихся при промежуточных углах входа, если известны углы β_1 и β_2 .

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Johnson W., Reid S. R. Ricochet of spheres off water//J. Mech. Eng. Sci. 1975. V. 17. N 2. P. 71—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. N 6. P. 279—284.
3. Hutchings I. M. The ricochet of spheres and cylinders from the surface of water//Inter. J. Mech. Sci. 1976. V. 18. N 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. N 2. P. 69—75.
5. Daneshi G. H., Johnson W. The ricochet of spherical projectiles off sand//Intern. J. Mech. Sci. 1977. V. 19. N 8. P. 491—497.
6. Бивин Ю. К. Изменение направления движения твердого тела на границе раздела сред//Изв. АН СССР. МТТ. 1981. N 4. С. 105—109.
7. Бивин Ю. К. Косой удар твердого тела о грунт или воду//Изв. АН СССР. МТТ. 1989. N 6. С. 185—189.