

УДК 539.374

ПРОНИКАНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА В СЛОИСТУЮ ПРЕГРАДУ

© 2019 г. Ю. К. Бивин

Институт проблем механики им. Ишлинского РАН, Москва, Россия
e-mail: srb@post.com

Поступила в редакцию 30.06.2018 г.

После доработки 30.06.2018 г.

Принята к публикации 10.09.2018 г.

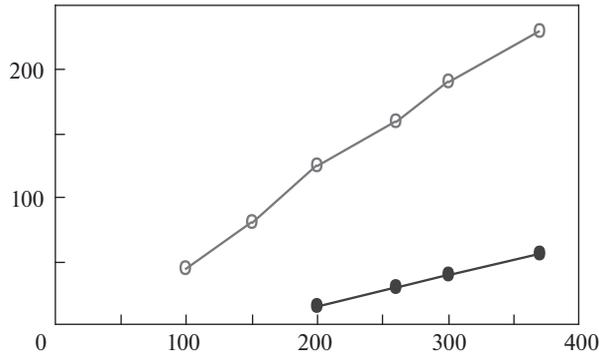
Приводятся результаты экспериментальных исследований проникания твердых тел по инерции в среду, составленную из слоев пластилина разной прочности (выдержанных при различной температуре). Использовался стальной шарик и коническое тело. Определялась зависимость глубины проникания от толщин и взаимного расположения замороженного и теплого слоев, а также влияние отношения толщины слоя к длине обтекаемого тела на результат.

Ключевые слова: проникание по инерции, слоистая среда, шар, конус

DOI: 10.1134/S0572329919030048

Исследования проникания твердых тел в сплошную среду начались с рассмотрения задач внедрения в однородную среду. В реальности часто возникает необходимость рассмотреть ту же проблему, когда среда неоднородна. В этом случае возникли два направления. В одном предлагались методы представления их в виде однородных с определением механических характеристик. В другом изучалось влияние неоднородности на результат проникания, а так же поиск оптимальной структуры неоднородности для решения конкретной проблемы. В нашем случае речь пойдет о проникании твердого тела по инерции в слоистую преграду и определении зависимости глубины проникания от расположения слоев с различными прочностными характеристиками. В монографиях [1, 2] приведены методы теоретического поиска оптимальных комбинаций слоев с конкретными механическими характеристиками при проникании твердого тела. В [3] автор представил результаты экспериментального исследования проникания стального шара в две слоистые среды. Одна состояла из свинцовых пластин толщиной $0.15d$, разнесенных на расстояние диаметра шара d . Во второй это расстояние заполнялось песком. Когда начальная скорость шара достаточна для пробития нескольких слоев, проводилось сравнение результатов. Вычислялся вес столбика высотой, равной глубине проникания, умноженной на единицу площади, нормальную к вектору скорости. Меньший вес оказался у среды, в которой промежуток между пластинами заполнен песком. Это преимущество сохраняется и в отношении чисто песчаной или свинцовой преграды. Но в данном случае сравнивались среды из материалов, отличающихся по нескольким параметрам, и роль каждого нельзя определить.

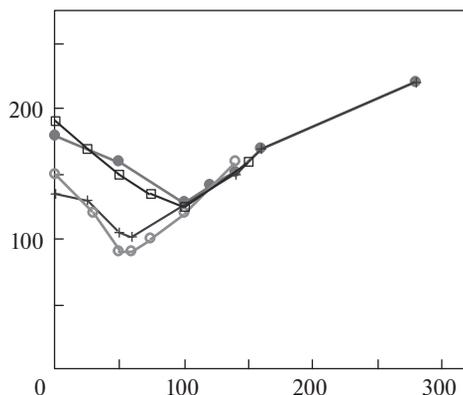
Здесь представлены результаты проникания шара и конического тела в среду, составленную из слоев пластилина, предварительно выдержанных при температуре $+25^{\circ}$ и -6°C . В этом случае они отличаются только по прочности, а плотность и скорость звука, играющие роль в динамике, совпадают. Пластилин формовался в виде плоских пластин нужной толщины диаметром 85 мм и при определенной температуре выдер-



Фиг. 1

живался не менее 6 часов. Это обеспечивало их однородность не только по температуре, но и по механическим характеристикам. При ударе твердым телом диаметром 10 мм по центру диска выполнялись условия проникания в полупространство. Мишень из плотно прилегающих слоев пластилина с различной температурой собиралась не больше, чем за минуту до выстрела, чтобы свести к минимуму выравнивание температур в зоне контакта. При размещении между слоями пластилина двух слоев кальки (для улучшения теплоизоляции) получилась та же глубина проникания. Выстрелы по мишени производились из пневматической пушки калибром 10 мм стальным шариком 10 мм и дюралевым конусом с диаметром основания 10 мм, углом раствора 8° , длиной 55 мм. На этом расстоянии от основания срезана вершина конуса.

На фиг. 1 кружками представлена зависимость глубины проникания в пластилин от начальной скорости удара стальным шариком при температуре $+25^\circ\text{C}$, а точками — при температуре -6°C . С увеличением начальной скорости от 100 до 400 м/с отношение глубин падает с 6 до 4. Глубина проникания определялась расстоянием от поверхности среды до передней точки тела. Прочностные характеристики пластилина при различных температурах определены так, как представлено в [4, 5]. Их отношение при температурах -6°C и $+25^\circ\text{C}$ составляет 18. Ясно, что при достаточной толщине мороженого слоя, когда при данной скорости он не пробивается, при данной возможности выбора расположения слоев он будет самым легким. Как располагать мороженный слой в теплом, когда он пробивается? На фиг. 2 представлены результаты проникания тела в трехслойный пластилин при одном мороженом, который пробивается при начальной скорости удара 370 м/с. При этой скорости шар проникает в мороженный пластилин на 56 мм, в теплый — на 230 мм. В экспериментах использовался мороженный слой толщиной 2 или 4 мм. По оси абсцисс толщина теплого слоя перед мороженым в миллиметрах, по оси ординат — глубина проникания H в миллиметрах. Результаты опытов с мороженым слоем толщиной 2 мм обозначены точками, а 4 мм — крестами. Вначале по мере увеличения толщины теплого слоя перед мороженым глубина проникания падает. Но это происходит при условии, что пробивается и мороженный пластилин, и используется полностью его повышенная сопротивляемость прониканию. К тому же с падением начальной скорости движения в нем возрастает роль прочностной составляющей в силе сопротивления. Если шар, пробив мороженный слой, останавливается в нем, то глубина проникания минимальна. Увеличение толщины переднего теплого слоя приводит к тому, что шар проникает в мороженный на все меньшую глубину, и уменьшение работы в нем должно компенсироваться увеличением работы в теплом. Это и приводит к увеличению глубины проникания. При толщине переднего теплого слоя, когда в четырехмиллиметровом мороженом шар останавливается на



Фиг. 2

глубине 2 мм, глубина его проникания совпадает с глубиной проникания при 2 мм мороженом и такой же толщине переднего теплового. С увеличением толщины теплового слоя перед мороженым в обоих случаях глубины проникания после этого сравниваются. Это и отражено на фиг. 2.

Для сравнения показан расчет проникания в слоистую преграду. Вычисления проводились при записи уравнения движения в виде

$$m \frac{dv}{dt} = - \left(\frac{c\rho S v^2}{2} + B \right)$$

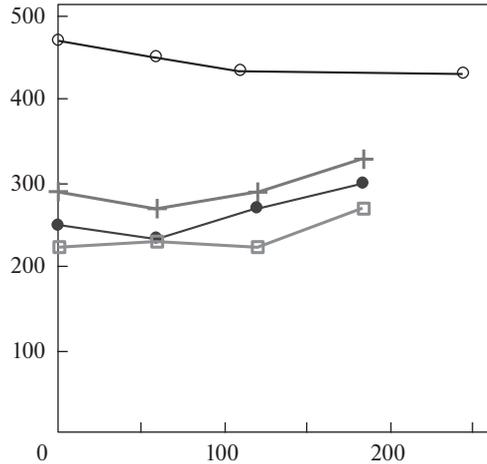
Здесь c — коэффициент формы тела. Для сферы он близок к 0.3 [6]. ρ — удельная плотность среды, S — площадь поперечного сечения шара, B — константа прочности среды. Она определялась по результатам проникания в пластилин заданной температуры. Слой считается пробитым, когда глубина проникания H при заданной начальной скорости входа v_0 в однородную сплошную среду с такими же механическими характеристиками равна его толщине.

$$H = (m/c\rho S) \ln \left(\frac{c\rho S v_0^2}{2B} + 1 \right)$$

Если при заданной скорости слой пробивается, т.е. H больше толщины слоя ΔH , то на выходе из него скорость определяется из следующего выражения

$$v_1^2 = \frac{2B}{c\rho S} \left(e^{\frac{c\rho S(H-\Delta H)}{m}} - 1 \right)$$

На фиг. 2 показан результат вычислений: кружками при толщине мороженого 4 мм, квадратами — 2 мм. В обоих случаях проявляется та же тенденция. По мере увеличения толщины теплового слоя перед мороженым вначале глубина проникания падает, потом растет, а минимальные значения глубины достигаются при той же толщине переднего слоя, что и в эксперименте. Что произойдет, если изменится соотношение плотностей слоев? Очевидно, что с увеличением отношения удельной плотности прочного слоя к ее значению слабого картина сохранится. При проникании с одной и той же начальной скоростью в эти слои разница между глубинами проникания в однородную среду возрастет. И наоборот. Поэтому, какой слой считать более слабым и как их взаимно



Фиг. 3

располагать, определяется зависимостью глубины проникновения от начальной скорости. На фиг. 1 у слабого слоя она проходит выше, чем у прочного.

В опытах с шаром длина части тела взаимодействующей с потоком, отнесенная к толщине прочного слоя, меньше единицы. Для слоя толщиной 2 см отношение равно 0.25, а 4 см – 0.125. При разных толщинах мороженого слоя требуется разная толщина теплового слоя перед ним, при которой глубина проникновения минимальна. В реальности есть участок траектории, где шар одновременно обтекает и теплым и холодным слоем, а в приведенном расчете этот фактор вообще не учитывается. А результат близок к эксперименту.

На фиг. 3 приведены результаты, полученные при стрельбе конусом длиной 55 мм. На графике по оси абсцисс показана толщина в миллиметрах теплового слоя перед единственным мороженым. По оси ординат глубина проникновения, определяемая расстоянием в миллиметрах от поверхности мишени до носка конуса. Кружками отмечены результаты проникновения при толщине мороженого $\Delta = 20$ мм, крестиками – $\Delta = 40$ мм, точками – $\Delta = 60$ мм, квадратами – $\Delta = 75$ мм. Начальная скорость во всех случаях равна 345 м/с. При этой начальной скорости в мороженый пластилин конус проникает на глубину 100 мм, в теплый – 530 мм. Снова рассматривается вариант, когда более прочный слой пробивается.

По мере увеличения глубины залегания мороженого слоя толщиной 20 мм глубина проникновения слегка падает. Это объясняется тем, что конус пробивает его все с меньшей скоростью, а значит, увеличивается зависящая от прочности доля силы его сопротивления при пробитии. При толщине мороженого слоя 75 мм до глубины его залегания 120 мм глубина проникновения почти не меняется. В режиме сплошного обтекания мороженым слоем конус может двигаться всего 20 мм, если его носик достигает тыльной стороны слоя. Но в теплом слое в зависимости от его толщины ситуация меняется. При толщине 60 мм снаряд проходит целиком в теплом слое после выхода из мороженого и до остановки 45 мм. При толщине 120 мм режим сплошного обтекания теплым слоем реализуется после полного погружения конуса и до столкновения с мороженым, что составляет 65 мм. Конус уже не пробивает мороженый слой. Он останавливается, когда его носик выходит с обратной стороны на 30 мм. При толщине теплового перед мороженым, равной 185 мм, режим сплошного обтекания в нем длится до столкновения с мороженым на пути 130 мм. В мороженый слой конус погружается

полностью и останавливается. То есть малая часть кинетической энергии тела тратится в мороженом слое, поэтому глубина проникания начинает увеличиваться. Это должно происходить, пока при рассматриваемой начальной скорости конус не остановится в теплом слое. При толщине мороженого слоя, близкой к длине обтекаемой части тела (в нашем случае $\Delta = 40$ мм и 60 мм), нет режима сплошного обтекания мороженым слоем. Но уже можно получить небольшое уменьшение глубины проникания, меняя расположение слоев.

Заключение. Возможность минимизации глубины проникания в слоистую преграду твердого тела по инерции при заданной начальной скорости возникает, когда: 1) известны отношения глубин проникания в полупространство с соответствующими механическими параметрами слоев; 2) толщина наиболее прочного слоя в несколько раз больше длины обтекаемой части тела.

Для наиболее полной реализации сопротивления прониканию наиболее прочного слоя перед ним следует размещать менее прочные слои такой толщины, чтобы при подходе прочному слою скорость тела упала до минимальной величины, при которой слой пробивается. До так называемого баллистического предела.

При отношении толщин слоев к длине обтекаемой части тела близком к единице порядок размещения слоев мало влияет на глубину проникания. При отношении больше единицы впереди следует размещать более прочный слой.

Работа выполнена по теме Госзадания (номер госрегистрации АААА-А17-117021310380-1) и при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-08-00775а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баничук Н.В., Иванова С.Ю. Оптимизация: контактные задачи и высокоскоростное проникание. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2016. 175 с.
2. Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T. Applied high-speed penetration dynamics. Netherlands Springer, 2006. 364 p.
3. Бивин Ю.К. Проникание твердых тел в сыпучие и слоистые среды // Изв. АН СССР. МТТ. 2008. № 1. С. 154–160.
4. Бивин Ю.К., Викторов В.В., Степанов Л.П. Исследование движения твердого тела в глинистой среде // Изв. АН СССР. МТТ. 1978. № 2. С. 159–165.
5. Бивин Ю.К., Колесников В.А., Флитман Л.М. Определение механических свойств среды методом динамического внедрения // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 5. С. 181–185.
6. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование нестандартных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2011. 208 с.