

УДК 539.374

© 1997 г. Ю.К. БИВИН

## КАВЕРНА ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ВХОДЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКУЮ СРЕДУ

Рассматриваются экспериментальные результаты исследования формы каверны, образующейся при вертикальном входе и дальнейшем движении по инерции твердого тела в упругопластической среде и жидкости. Выявлена зависимость кривизны окончатальной каверны в такой среде от скорости движения тела и прочности среды. Установлена зависимость ширины каверны за движущимся телом от его массы, формы обтекаемой части, плотности и прочности среды. Ширина каверны определялась углом раствора усеченного конуса, имеющем в меньшем сечении диаметр окружности, равный диаметру сечения тела, по которому происходил срыв потока, а в большем сечении — диаметр каверны на некотором расстоянии за телом.

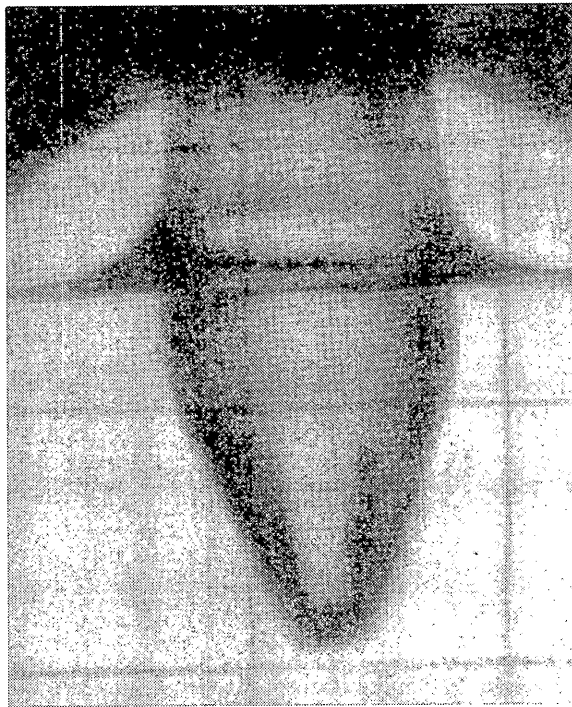
Впервые кавитационный режим обтекания твердого тела при его движении в среде, обладающей прочностью, рассматривал Р. Хилл в сороковых годах. Результаты опубликованы в 1980 году [1]. Им отмечена колоколообразная форма каверны, которая образовалась при опытах по прониканию по инерции твердого тела в металлическую мишень. В теоретическом анализе такая форма определяется силой торможения, действующей на тело по мере погружения его в среду. При сделанных в [1] предположениях она всегда колоколообразная. В то же время в жидкости стационарная и нестационарная каверна за твердым телом имеет кривизну другого знака [2], [3]. Ширина стационарной каверны только при около и сверхзвуковых скоростях движения тела зависит от скорости [4]. Известно, что роль прочности среды в явлениях, связанных с обтеканием твердого тела, с увеличением скорости его движения снижается [5]. В связи с этим возникает вопрос о скоростях движения твердого тела, при которых возможно изменение кривизны каверны в прочной среде и зависимости ее ширины от скорости движения.

В опытах в качестве рабочей среды использовался пластилин и вода. При комнатных температурах пластилин достаточно прочен, чтобы прочность оказывала влияние на процесс образования каверны, когда скорость внедрения тела составляет несколько сот метров в секунду с другой стороны, при таких скоростях и в диапазоне комнатных температур можно выбрать такое их сочетание, что каверны, образующиеся за телом в жидкости и в пластилине будут схожи.

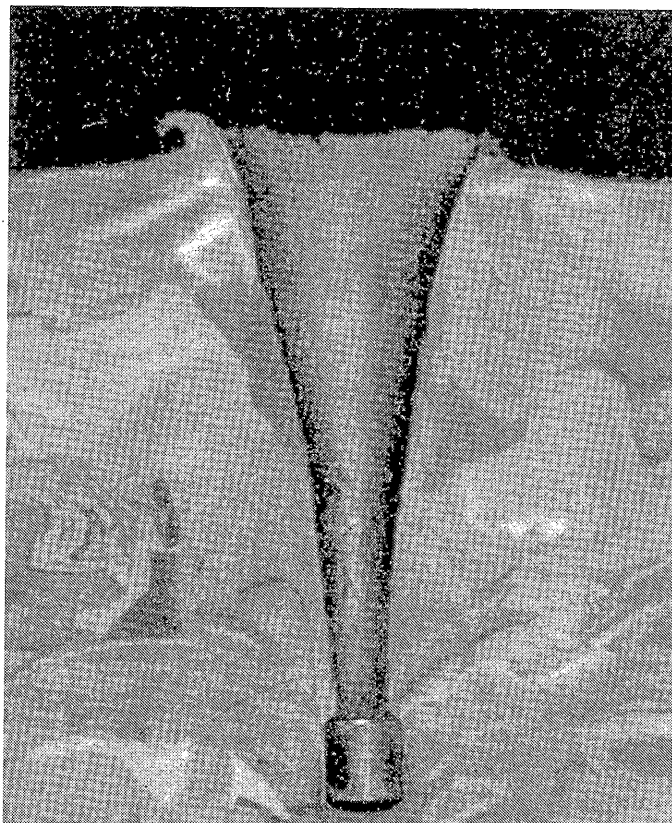
Пластилин формировался в основном в капроновой трубе с внутренним диаметром 90 мм или в виде прямоугольного блока размером 300 × 300 × 600 мм, чтобы реализовались условия входа в полупространство на всех скоростях. Разгон тел осуществляется на пневмопушке. Скорость тела на выходе из ствола определялась с помощью фотодиодов, установленных на расстоянии 100 мм друг от друга по оси стрельбы. Сигнал с фотодиодов после прохождения преобразовательного блока поступал на частотомер, который регистрировал время пролета расстояния между ними. Для сравнения было проведено несколько выстрелов в воду. При этом калибр тел и их форма были аналогичны телам, использовавшимся при внедрении в пластилин, т.е. они



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

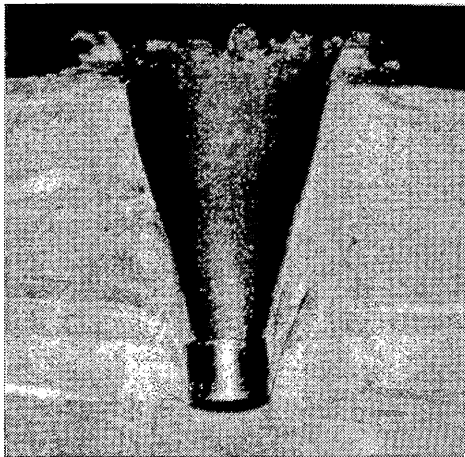
имели цилиндрическую форму с коническими наконечниками или просто цилиндрическую. При стрельбе в воду производилась скоростная киносъемка процесса движения и развития каверны. Для этого использовалась кинокамера ЖЛВ-2. Бак для воды имел размер в плане  $60 \times 80$  см и глубину 80 см, и был изготовлен из листового оргстекла толщиной 30 мм.

На фиг. 1, 2 приведены фотографии каверн, образующихся при выходе в воду цилиндров. В первом случае отношение массы  $M$  цилиндра к площади его поперечного сечения  $S$  составляет  $20,5 \text{ г/см}^2$ , скорость входа  $325 \text{ м/с}$ . Во втором —  $M/S = 1,44 \text{ г/см}^2$ ,  $v = 655 \text{ м/с}$ . При  $M/S = 20,5 \text{ г/см}^2$  ширина каверны близка к стационарной в диапазоне скоростей  $60\text{--}500 \text{ м/с}$  и в пределах точности эксперимента не зависит от скорости. При  $M/S = 1,44 \text{ г/см}^2$  каверна получилась значительно шире, что определяется сильным торможением из-за малого значения  $M/S$ . Т.е. в исследуемом диапазоне скоростей ширина каверны определяется параметром, зависящим от отношения плотности жидкости к плотности тела, которую можно определить как отношение его массы к кубу линейного размера сечения тела, по которому происходит срыв потока и начинает образовываться каверна. Кривизна же каверны во всех случаях одного знака.

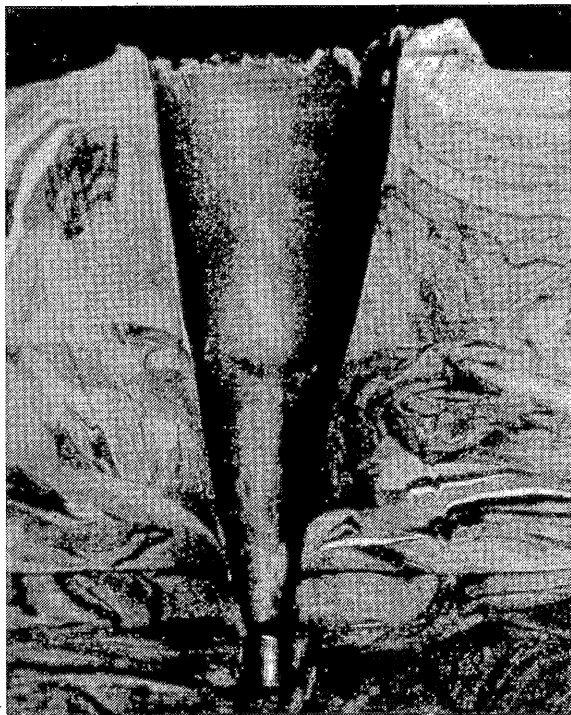
В упругопластической среде на ширину каверны и ее кривизну влияет прочность среды, скорость движения, отношения плотности среды к плотности тела. На фиг. 3, 4 показан вид становившейся каверны при проникании цилиндра в пластилин при  $t = 22,5^\circ\text{C}$ . В первом случае  $M/S = 4,46 \text{ г/см}^2$ ,  $v = 370 \text{ м/с}$ , во втором случае  $M/S = 2,24 \text{ г/см}^2$ ,  $v = 850 \text{ м/с}$ . В обоих случаях каверны колоколообразные. При температуре  $24,5^\circ\text{C}$ , когда прочность пластилина падает примерно на 25% по сравнению с



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8

его прочностью при  $22,5^{\circ}\text{C}$ , при  $v = 405$  м/с кривизна каверны начинает меняться (фиг. 5, где  $M/S = 1,91$  г/см<sup>2</sup>). Здесь прочность пластилина характеризуется константой пластичности. Это более заметно при  $v = 500$  м/с,  $t = 24,5^{\circ}\text{C}$  (фиг. 6, где  $M/S = 4,45$  г/см<sup>2</sup>). Поскольку в этом случае тело более тяжелое, то оно проходит больший путь, как на участке, где скорость выше той, на которой в пластилине образуется каверна той же кривизны, что и в жидкости, так и после снижения скорости до значения, когда образуется колоколообразная каверна. С повышением скорости входа становится еще более заметно различие в характере каверны на различных глубинах погружения тела (фиг. 7, где  $M/S = 4,6$  г/см<sup>2</sup>,  $v = 710$  м/с,  $t = 24,5^{\circ}\text{C}$ ).

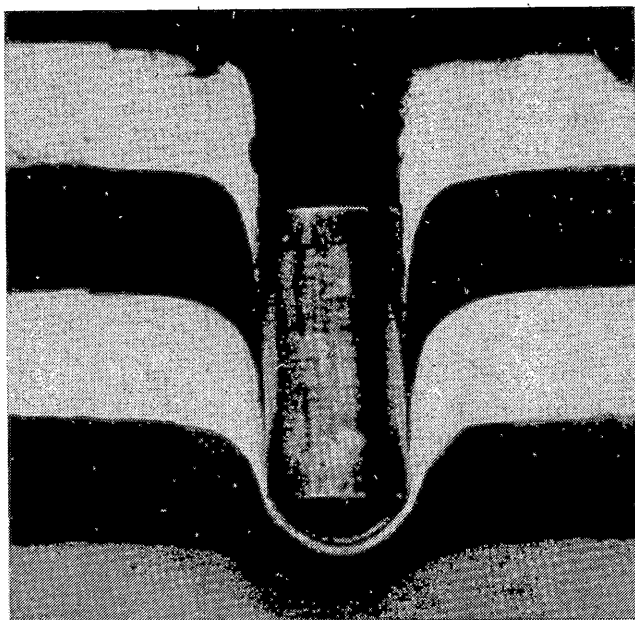
Если тело достаточно легкое, чтобы глубина его внедрения была небольшой при скоростях соударения, приводящих к образованию колоколообразной каверны, то при более высоких скоростях входа таких тел в упругопластическую среду, когда вначале образуется каверна такой же кривизны как и в жидкости, можно получить окончательную каверну очень близкую по форме к каверне в жидкости в момент погружения такого же тела на глубину остановки тела в пластилине. Это видно из сравнения фиг. 2 и фиг. 8, где  $M/S = 1,35$  г/см<sup>2</sup>,  $v = 775$  м/с.

В пластилине при  $t = 24,5^{\circ}\text{C}$  скорость движения, выше которой кривизна остановившейся каверны становится такой же как и в жидкости, составляет  $\sim 350$  м/с. Это значение определено по глубине проникания тела, показанного на фиг. 7, на участке, где каверна имеет колоколообразную форму. Именно при скоростях соударения 350 м/с тело погружается на глубину, близкую к длине колоколообразной части каверны, показанной на фиг. 7. При скорости 400 м/с уже появляется участок каверны с кривизной обратного знака (фиг. 5).

Скорость 350 м/с почти вдвое ниже скорости звука в пластилине. Поэтому смена знака кривизны каверны определяется не проявлением сжимаемости среды, а ее прочностью, а, вернее, отношением прочности среды к скоростному напору. Влияние прочности и скорости демонстрируют фиг. 3–6. Влияние скоростного напора выясняется из опытов с коническими телами, для которых коэффициент сопротивления, входящий множителем в скоростной напор, меньше чем у диска. Например, у конуса с углом полураствора  $45^{\circ}$  он почти вдвое меньше, чем у диска, и скорость соударения его с пластилином, при которой кривизна каверны становится такой же как и в жидкости за ним, почти вдвое выше, чем у диска.

Тем, что кривизна каверны зависит от отношения прочности к скоростному напору, можно объяснить ее высокую чувствительность для диска к изменению температуры. Дело в том, что при обтекании диска средой, обладающей прочностью, перед ним образуется застойная зона в виде сегмента сферы или конуса (в зависимости от свойств среды). Таким образом, происходит обтекание не диска, а тела с меньшим коэффициентом сопротивления. При этом радиус сферического сегмента или угол раствора конуса тем меньше, чем прочнее среда. Правда, с другой стороны, они тем больше, чем выше скорость движения. При квазистатическом режиме движения в пластилине застойная зона на диске имеет вид полусферы (фиг. 9). С увеличением скорости движения высота шарового сегмента уменьшается. На фиг. 10 показано проникание со скоростью 140 м/с в пластилин при  $t = 25^{\circ}\text{C}$ . Как быстро это происходит с изменением скорости зависит от прочности среды (для пластилина – от температуры).

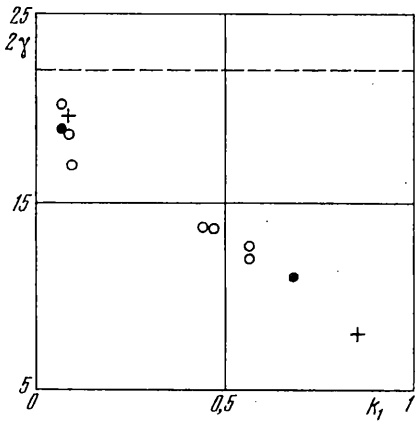
В некоторых случаях в гидро и терра динамике существенным является не только кривизна, но и ширина каверны. На фиг. 11 показана зависимость угла раствора каверны  $2\gamma$  (ось ординат) для пластилина при  $t = 24,5^{\circ}\text{C}$  от безразмерного параметра  $k_1 = mg/C_*\rho v^2 S$  (ось абсцисс). Здесь кружочками обозначены результаты для диска, точками – для конуса с углом полураствора  $\alpha = 45^{\circ}$ , крестами – для конуса с углом полураствора  $\alpha = 30^{\circ}$ ,  $v$  – скорость соударения,  $C_*$  – гидродинамический коэффициент сопротивления,  $\rho$  – плотность среды,  $m$  – масса тела,  $g$  – ускорение свободного па-



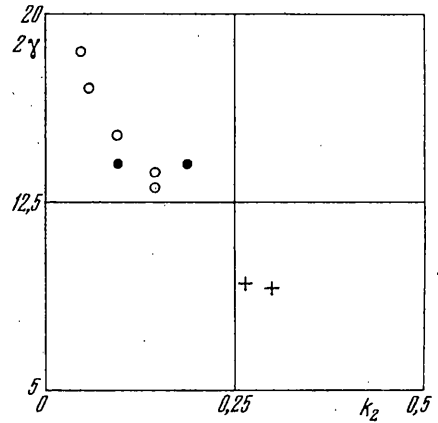
Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 12

дения. Раствор каверны определяется во всех случаях на участке погружения длиной пять диаметров сечения тела, по которому происходит срыв потока. Из графика видно, что в пределах точности эксперимента для тел различной конфигурации точки объединяются одной зависимостью от параметра  $k_1$ , если взять  $C_* = 1$  для диска,  $C_* = 0,52$  для конуса с  $\alpha = 45^\circ$  и  $C_* = 0,38$  для конуса  $\alpha = 30^\circ$  [5]. Штриховой линией отмечен угол раствора стационарной каверны в жидкости. Следует отметить, что результаты для каверны в пластине получены в условиях, когда масса тела была достаточной при заданной скорости, чтобы глубина проникания была существенно больше 5 калибров тела. В данной серии диапазон скоростей определялся изменением массы тела, отнесенной к площади миделя, в пределах 6–20 г/см<sup>2</sup>. Угол раствора стационарной каверны в жидкости устанавливался по серии экспериментов, в которых выявлялась зависимость его от массы тела. Оказалось, что при отношении массы цилиндра к площади его поперечного сечения более 20 г/см<sup>2</sup>, угол раствора каверны не меняется. Исходя из этого, в пластине для диска при скорости около 1000 м/с угол раствора каверны на входе будет близок к углу раствора каверны в жидкости и кривизна каверны будет такой же как в жидкости.

На фиг. 12 показана зависимость угла раствора каверны (ось ординат) в пластине от параметра  $k_2 = \tau_s / \rho v^2 C_*$  (ось абсцисс), где  $\tau_s$  – константа пластичности пластины, определяемая в соответствии со способом, изложенным в [5]. При этом оставалось неизменным отношение массы тела к площади миделя. Оно составляло 6,5 г/см<sup>2</sup>. Угол раствора каверны в жидкости для этого значения отношения массы тела к площади миделя составляет 27°. Видно, что при отношении прочности среды к скоростному напору  $\sim 0,5$  ширина каверны уменьшается более чем в пять раз и только при значении параметра  $k_2 < 0,01$  прочность среды почти не оказывает влияния на ширину каверны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16530) и Международного научного фонда (MN-1000).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill R. Cavitation and the influence of headshape in attack of thick targets by non-deforming projectiles // J. Mech. and Phys. Solids. 1980. V. 28. No. 5/6. P. 249–263.
2. Логвинович Г.В. Гидродинамика течений со свободными границами. Киев: Наук. думка, 1969. 215 с.



3. Бивин Ю.К., Глухов Ю.М., Пермяков Ю.В. Вертикальный вход твердых тел в воду // Изв. АН СССР. МЖТ. 1985. № 6. С. 3–9.
4. Бахрах С.М., Винокуров О.А., Горбенко Г.В., Ковалев Н.П., Осипов Ю.А., Торопов Т.А. Численное исследование процесса проникания с постоянной скоростью в сжимаемую жидкость недеформируемых цилиндров // ПМТФ. 1989. № 5. С. 150–155.
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.

Москва

Поступила в редакцию  
1. VIII. 1995