

УДК 539.374

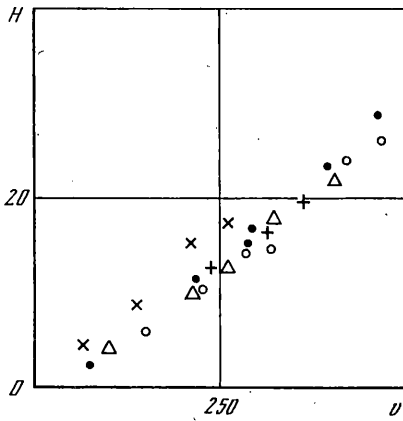
© 1999 г. Ю.К. БИВИН

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОНИКАНИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ И КОНИЧЕСКИХ ТЕЛ

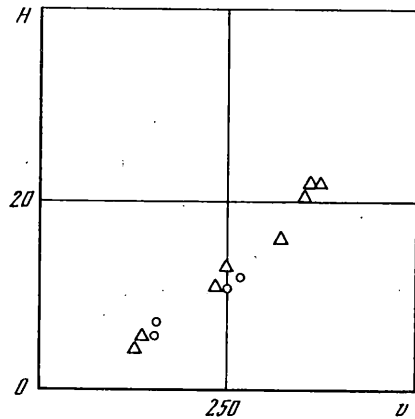
Приводится сравнение проникания по инерции в пластилин и песок конических и звездообразных тел. Показано, что при выбранных параметрах среды, геометрии тел и диапазоне начальных скоростей звездообразные тела проникают на глубины, близкие к глубинам проникания конусов с углами раствора, равными среднему значению углов раствора конусов, на поверхности которых ложатся линии пересечения граней на внешних и во внутренних углах звездообразного тела. Количество лепестков звезды слабо влияет на глубину проникания при равенстве других параметров, в том числе и средних углов. Отмечена зависимость поведения звездообразного тела при его наклонном входе от положения лепестков звезды относительно плоскости, в которой лежат нормаль к поверхности среды и вектор скорости.

В настоящее время накоплено значительное количество материала, как теоретического, так и экспериментального, по глубинам проникания в грунтовые среды тел вращения различной геометрии: конических, сферических, оживальных. Обзор этих работ, вышедших из печати до 1978 г., дан в [1]. В последние годы появился ряд работ, посвященных поиску оптимальных форм тел вращения (оживальных или конических), обеспечивающих при прочих равных параметрах достижение максимальных глубин проникания [2–3]. Примерно в это же время ряд авторов в нашей стране занялся исследованием проникающей способности звездообразных тел, имеющих в поперечном сечении звездчатую форму с различным количеством концов, и сравнением их с коническими телами [4–6]. При определенном способе сравнения получалось, что звездообразные тела имеют некоторое преимущество (проникают глубже) перед простыми коническими проникателями.

Ниже приводится сравнение глубин проникания по инерции конических и звездообразных тел, имеющих одинаковую массовую нагрузку на площадь миделева сечения. При таком сопоставлении различие в проникании с одинаковой начальной скоростью будет определяться геометрией тела. Испытывались конические тела разных углов раствора. Звездообразные тела характеризуются гораздо большим числом геометрических параметров. Характеристики звездообразных тел, выбранных в данном случае, описаны ниже. Экспериментальные результаты получены для обеих групп тел в совершенно одинаковых условиях. Были использованы одни и те же среды (пластилин, песок) при одной и той же температуре; пластилин достаточное время выдержан при постоянной температуре для стабилизации его свойств, а песок использовался одинакового состава и плотности, подготовленный так, чтобы не сказывались свойства его "памяти" [7]. Тела, которые при движении в среде взаимодействовали с ней по конической поверхности, имели цилиндрическую часть диаметром, равным диаметру основания конуса, и длиной, равной этой же величине. Все тела изготавливались из дюралюминия. Соударение со средой происходило по нормали к ее



Фиг. 1



Фиг. 2

свободной поверхности. Размеры мишени выбирались такими, чтобы реализовывались условия проникания в полупространство.

Испытывались четырех- и шестилепестковые звездообразные тела. Они изготавливались из усеченных конических тел. Вершины по всей длине были заостренными, а противоположные грани во внутренних углах пересекались. Четырехконечное тело по вершинам внешних углов имело конусность $\alpha_e = 38,5^\circ$, по вершинам внутренних углов — $\alpha_i = 24,3^\circ$. В дальнейшем будет использоваться величина $\alpha_1 = (\alpha_e + \alpha_i)/2 = 31,4^\circ$, которую назовем средней конусностью. Нормальное сечение тела у основания в данном случае образовывало звездочку, которая описывалась окружностью диаметром 30 мм, а внутри ее вписывалась окружность диаметром 18,5 мм. У вершины, соответственно, — 6,3 и 3,9 мм. Второе тело с шестиконечной звездочкой в сечении имело такие же α_i и α_e , а значит и $\alpha_2 = 31,4^\circ$. У основания и вершины звездочки вписывались и описывались в окружности тех же диаметров. Оба тела имели удлинение 1,13. Таким образом, отличие состояло в числе концов звездочки. Третье тело, имеющее в сечении шестиконечную звезду, имело конусность $\alpha_e = 34,6^\circ$, $\alpha_i = 24^\circ$ ($\alpha_3 = 29,3^\circ$). У основания звездочка описывалась окружностью 30 мм, и в нее вписывалась окружность диаметром 20,5 мм. У вершин, соответственно, — 8,2 и 5,6 мм. Его удлинение — 1,17. Оно еще отличалось от другого шестиконечного тела большим притулением и меньшей средней конусностью.

На фиг. 1 показана зависимость глубины проникания H (в см) от начальной скорости v_0 (в м/с) при проникании в пластилин, имеющий температуру $19,5^\circ\text{C}$. Прямым крестом, темными точками, светлыми точками, треугольниками и косым крестом обозначены результаты для тел 1, 2, 3 и круговых конусов с углами раствора $\alpha = 30^\circ$ и 13° . На фиг. 2 собраны данные по прониканию в песок кругового конуса с углом раствора $\alpha = 30^\circ$ (треугольники) и звездообразного тела с $\alpha_3 = 29,3^\circ$ (светлые точки).

Различие в глубинах для конфигураций одинаковой средней конусности, но в сечении имеющих звездообразную форму с различным числом концов, лежит в пределах погрешности эксперимента. Слабая зависимость коэффициентов сопротивления звездообразных тел от количества концов звезд при их движении в газобразной среде отмечена в [5]. При движении в грунтовых средах также получается, что количество концов звезды — параметр, который слабо влияет на ее проникающую способность. В то же время изменение средней конусности, даже небольшое, как в данном случае, проявляется довольно заметно. Т.е. количество концов звезды мало влияет на проникающую способность, если при этом сохраняются неизменными другие геометрические параметры, в данном случае — средний угол конусности. С

другой стороны, обнаружено, что глубина проникания звездообразных тел при заданной массовой нагрузке на мидель и средней конусности близка к глубине проникания конического тела той же конусности и с той же массовой нагрузкой на мидель. На этом основании можно высказать предположение, что средний угол конусности может оказаться одним из основных параметров, характеризующих проникающую способность звездообразных конусов. На рис. 1 показано, что обычные круговые конуса (косой крест) более заостренные, чем внутренний угол конусности звездообразных тел, проникают значительно глубже последних. Коническое тело, имеющее угол раствора больший, чем угол конусности вершин внешних углов звездообразного тела, проникает на меньшую глубину. Можно ожидать, что сила сопротивления движению звездообразных тел будет лежать между силой сопротивления круговых конусов, вписанного и описанного вокруг звездообразного тела.

Теоретическую оценку угла раствора кругового конуса, проникающего на ту же глубину, что и звездообразное тело, можно сделать, если воспользоваться представлением силы сопротивления, приведенным в [3, 4]: $-F_C = \frac{1}{2}\rho v^2 SC + bS\tau + S_1\tau$. Здесь ρ , v , S , C – плотность среды, скорость движения тела, площадь миделева сечения, коэффициент гидродинамического сопротивления. Как следует из теории и подтверждается экспериментально, для проводившихся опытов с пластилином $b \sim 20$, τ – предел текучести Мизеса, $S_1\tau$ – составляющая силы сопротивления, возникающая за счет действия касательных сил на поверхности тела. В случае конуса S_1 – проекция его смоченной поверхности на направление движения.

Коэффициент гидродинамического сопротивления тела зависит от угла поворота потока при его обтекании. Для конических тел он определяется углом раствора конуса. При обтекании звездообразных тел поток движется во внутреннем угле звезды параллельно двум обращенным друг к другу пересекающимся граням, т.е. вдоль линии, которая им параллельна. Это направление, очевидно, определяется линией пересечения граней. Она наклонена к оси тела (и направлению движения в нашем случае) под углом, равным углу полураствора конуса, вписанного в звездообразное тело. Поэтому коэффициент гидродинамического сопротивления для звездообразного тела будем считать близким его значению для вписанного конуса. Величина $S_{13}\tau$ для звездообразных тел складывается из элементарных сил, действующих по всей площади граней звезды. Их направление соответствует направлению потока и, следовательно, наклонено к направлению движения под углом, равным углу полураствора вписанного конуса. Это определяет способ вычисления S_{13} для звездообразных тел $S_{13} = nS_0 \cos \alpha_i$, где S_0 , n – площадь одной грани и число граней.

Для усеченных звездообразных тел, которые были испытаны в данном случае, сила сопротивления запишется в виде:

$$-F = \frac{1}{2}\rho v^2 [C_3 S_3 + S_k (C_k - C_3)] + bS_3\tau + S_{13}\tau$$

Здесь S_3 – площадь миделева сечения звезды, S_k – площадь основания отсеченной части звезды (кавитатора), C_3 – коэффициент сопротивления звезды без затупления, C_k – коэффициент сопротивления кавитатора (принимается равным 0,82), S_k – площадь кавитатора.

Интегрируя уравнение движения при начальных условиях: $H = 0$, $dH/dt = v_0$, $t = 0$, получим глубину проникания H для конического тела

$$H = \frac{m}{\rho CS} \ln \left[1 + \frac{\rho C v_0^2}{2(b + S_1/S)\tau} \right]$$

Для звезды

$$H = \frac{m}{\rho [C_3 + (S_k/S_3)(C_k - C_3)] S_3} \ln \left[1 + \frac{\rho [C_3 + S_k/S_3 (C_k - C_3)] v_0^2}{2[b + S_{13}/S_3]\tau} \right]$$

Определение влияния геометрии тела или его террадинамических характеристик на глубину проникания необходимо проводить при равенстве остальных параметров процесса: m/S , ρ , ν_0^2 , τ . В такой постановке и проводился эксперимент.

Коэффициент сопротивления эквивалентного конуса C получается из сравнения глубин проникания его и звездообразного тела

$$\frac{1}{C} \ln \left[1 + \frac{\rho C \nu_0^2}{2(b + S_1/S)\tau} \right] = \frac{1}{[C_3 + (S_k/S_3)(C_k - C_3)]} \ln \left(1 + \frac{\rho[C_3 + S_k/S_3(C_k - C_3)]\nu_0^2}{2[b + S_{13}/S_3]\tau} \right)$$

В опытах по проникновению конических тел в пластилин было установлено, что коэффициент C близок к его значению в жидкости при установившемся обтекании соответствующих тел безграничным потоком несжимаемой жидкости в режиме развитой кавитации [8]. Величина для пластилина при температурных условиях эксперимента составила $5,5 \cdot 10^5$ Па. Тогда для звездообразного тела № 1 на основании вычисленного значения C получится угол раствора больше его среднего на 1° , для тела № 2 – на $1^\circ 50'$, для тела № 3 – на $1^\circ 10'$. Эти расчетные отклонения углов раствора лежат в пределах точности эксперимента. Однако для подтверждения возможности характеризовать звездообразные тела средней конусностью, как параметром при сравнении их проникающей способности, необходимы более детальные исследования.

Здесь рассмотрен случай прямого входа. Пробные эксперименты при косом входе показали, что звездообразные тела из-за своей осевой несимметрии ведут себя крайне нестабильно. Это определяется степенью несимметричности их относительно плоскости, проходящей через вектор скорости и нормаль к свободной поверхности среды проникания в точке соударения. Эта несимметрия может быть разной в каждом конкретном случае. Отметим тот факт, что в случае пластилина (фиг. 1) проникание происходило в дозвуковом режиме движения. В случае песка (фиг. 2) в начале проникания движение было сверхзвуковым.

В цитируемой литературе сравнение конических и звездообразных тел по проникающей способности в прочные среды, или по коэффициентам сопротивления в жидкости проводится при одинаковых площадях миделя. При этом, для того, чтобы полностью определить коническое тело, необходимо задать еще один параметр. Задают либо длину, либо объем. При одинаковых значениях этих величин у конуса и звездообразного тела ищут значения других параметров звездообразных тел, при которых они испытывают меньшую силу сопротивления при движении. Такими остающимися свободными параметрами для звездообразных тел могут быть выбраны угол раствора луча звезды и количество ее концов. При этом, как легко проверить, всегда можно выбрать такие сочетания этих параметров, что средний угол конусности звезды будет меньше угла раствора уже заданного конуса. В этом случае звездообразное тело в некотором диапазоне скоростей, где силы трения не играют основной роли, может обладать преимуществом перед заданным для сравнения конусом, как показали приведенные результаты эксперимента. С другой стороны, если для конических тел не требовать остроконечности, то и для них появляется свободный параметр, скажем, притушение. Используя его в плотных средах, можно значительно снизить их сопротивление движению, добиваясь кавитационного режима обтекания. Поэтому, если обсуждается вопрос о выборе наиболее оптимальной формы тела, проникающего на максимальную глубину при заданной начальной скорости и массе, то очень важно, какие дополнительные требования или ограничения существуют. Ясно, что если ограничивается удлинение и площадь миделя или производится выбор между звездообразными и коническими телами, то он будет зависеть от характеристик среды и начальной скорости. Кроме того, при малом угле раствора конуса, а значит и малом гидродинамическом сопротивлении, трудно создать реальное звездообразное тело с меньшим гидродинамическим сопротивлением (с меньшим средним углом раствора конусности).

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 96-01-00021).

Автор благодарит И.В. Симонова за обсуждение результатов и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Backman M.E., Goldsmith W.* The mechanics of penetration of projectiles into targets // Intern. J. Eng. Sci. 1978. V. 16. № 1. P. 1–99.
2. *Yankelevsky D.Z.* The optimal shape of an earth penetrating projectile // Intern. J. Solids Struct. 1983. V. 19. № 1. P. 25–31.
3. *Бивин Ю.К., Симонов И.В.* Оценки глубин проникания жестких тел в грунтовые среды при сверхзвуковых скоростях входа // Докл. РАН. 1993. Т. 328. № 4. С. 447–450.
4. *Бондарчук В.С., Ведерников Ю.А., Дулов В.Г., Минин В.Ф.* К оптимизации звездообразных ударников // Изв. СО АН СССР. 1982. Сер. техн. н. № 13. Вып. 3. С. 60–65.
5. *Гонор А.Л., Поручиков В.Б.* Проникание тел звездообразной формы в сжимаемую жидкость // ПММ. 1989. Т. 53. Вып. 3. С. 405–412.
6. *Велданов В.А.* Проникание в грунт ударников нетрадиционных форм // Механика импульсных процессов. М.: Гр. МВТУ, 1989. № 530. С. 85–97.
7. *Бивин Ю.К.* Косой удар твердого тела в грунт или воду // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 6. С. 185–189.
8. *Бивин Ю.К., Колесников В.А., Флитман Л.М.* Определение механических свойств среды методом динамического внедрения // Изв. АН СССР. МТТ. 1982. № 5. С. 181–184.

Москва

Поступила в редакцию
4.11.1997