

УДК 539.374

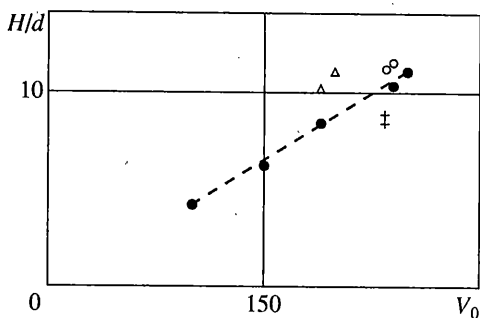
© 2002 г. Ю.К. БИВИН

ДВИЖЕНИЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ВОЗМУЩЕННОЙ СРЕДЕ

Прониканию тел по инерции в однородное изотропное полупространство по нормали или под углом к свободной границе посвящено значительное количество работ. Обзор их можно найти в [1]. Основное внимание в этих работах уделяется характеристикам проникания осесимметричных тел различной геометрии при различном отношении их плотности и прочности к плотности и прочности среды. Эффекты, возникающие при начальном движении тела параллельно и вблизи свободной или твердой границы полупространства, рассмотрены в [2, 3]. Отмеченные в этих работах особенности изменения характеристик проникания свободного тела связаны, в конечном итоге, с нарушением осевой симметрии сил сопротивления, действующих на осесимметричное тело при движении, т.е. нарушением осевой симметрии напряженного состояния среды. Как изменятся характеристики проникания в однородное изотропное, свободное от начальных напряжений, полупространство в случае нарушения одного или нескольких из этих определяющих условий? Чтобы при экспериментальном исследовании этого вопроса на оценку не накладывалось влияние изменения геометрии обтекаемой части тела в процессе проникания, естественно выбрать шар, движение которого в данном случае будет определяться движением его центра тяжести.

Ниже представлены результаты исследования влияния на характеристики проникания различных факторов, изменяющих поле напряжений, возникающих в случае движения твердого тела в однородном изотропном полупространстве, свободном от начальных напряжений. Рассмотрены следующие случаи: проникание в предварительно напряженную среду, не изменяющую симметрии поля напряжений, возникающих при проникании; проникание при наличии жесткой границы на поверхности полупространства или скважины на его свободной поверхности; проникание при одновременном параллельном движении других тел; проникание в неоднородную среду, или в слой конечной толщины.

Рабочей средой служил пластилин или кварцевый песок воздушной влажности, максимальное зерно которого проходило через сито с ячейкой 0.63 мм. Перед экспериментом его плотность доводилась до 1.64 г/см³. Контейнер для песка имел глубину 800 мм, поперечное сечение 300 × 300 мм. Пластилин формовался или в виде блока с такими же размерами или в полиэтиленовой трубе внутренним диаметром 150 мм. При нужной температуре пластилин выдерживался не менее четырех часов с точностью 0.5°C, что позволило избежать заметных разбросов глубин проникания, связанных с зависимостью прочности пластилина от температуры. Выбранные так поперечные размеры мишени обеспечивали условия проникания в полупространство в исследованном диапазоне скоростей при стрельбе по центру. Это было установлено экспериментально таким образом. При некоторой начальной скорости входа тела в среду размеры мишени от выстрела к выстрелу увеличивались до тех значений, при которых на результатах проникания переставали сказываться граничные условия на боковой и тыльной поверхности мишени. При этом контролировалась глубина



Фиг. 1

полупространства в данном случае связаны не только с диаметром шара, но и со скоростью его движения, т.е. чем больше начальная скорость тела, тем больше диаметр каверны на входе и глубина проникания, а значит должны увеличиваться габариты мишени для получения результатов, соответствующих прониканию в полупространство.

В качестве проникающего тела использовались стальные шарики диаметром 10 и 9.5 мм. До нужной скорости они разгонялись на пневматической пушке. В первом случае диаметр ствола пушки был 10 мм, во втором шарик или шарики помещались в цилиндрический стакан диаметром 30 мм и в нем разгонялись до нужной скорости в стволе пушки калибром 30 мм. На конце ствола пушки на расстоянии 100 мм вдоль оси были установлены два фотодиода, а напротив них – два источника света с диаметром луча 2 мм. Тело, вылетая из ствола пушки, перекрывало свет, падающий на фотодиоды, и это позволяло определить время пролета телом базового расстояния. Регистрация этого времени производилась с помощью частотомера и осциллографа.

Опыты с пластилином. На фиг. 1 приведены результаты опытов по прониканию шара по нормали к свободной поверхности пластилина при температуре 22°C. По оси абсцисс – скорость соударения v_0 в м/с, по оси ординат – глубина H проникания шара, отнесенная к его диаметру d . Темные точки отмечают глубину проникания в полупространство. Кресты – в полупространство, где пластилин предварительно сжимался статически до напряжения $7 \cdot 10^4$ Па вдоль одной оси, перпендикулярной оси стрельбы; светлые точки – в пластилин со свободными от напряжений поверхностями, но перед опытом блок пластилина был сдеформирован на 20% в одном направлении, перпендикулярном оси стрельбы; светлые треугольники – в пластилин, имеющий размер в направлении оси стрельбы на три с половиной калибра больше глубины проникновения в полупространство на данной скорости. Напряжение сжатия создавалось стальной плитой, помещенной на горизонтальной грани пластилинового блока. Величина напряжения $7 \cdot 10^4$ Па выбрана, исходя из того, что при большем одноосном напряжении сжатия при данной температуре пластилин начинает заметно течь при статической нагрузке. При динамическом нагружении, возникающем в процессе проникания, при температуре 22°C пластическое состояние, определенное по методике изложенной в [5] достигается при $\tau_s = 4 \cdot 10^5$ Па. Как предварительное сжатие, так и деформирование пластилина происходило фактически без проскальзывания между сжимающими плитами и пластилином. Поэтому в первом случае в пластилине возникали предварительные напряжения сжатия и по двум другим направлениям, хотя и меньшие, чем по основному, а во втором после снятия усилий сжатия в пластилине возникали остаточные напряжения растяжения, и уже в среду с такими предварительно существующими напряжениями происходило проникновение.

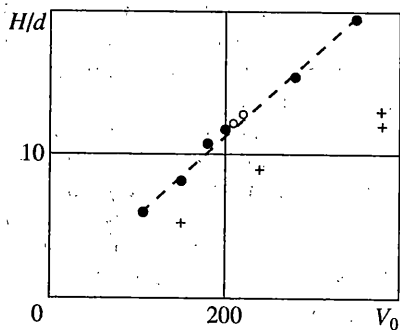
Результаты таковы, что напряжения сжатия снижают глубину проникновения в пластическую среду. В данном случае это уменьшение примерно соответствует увеличению прочности среды на величину приложенных статических напряжений при

проникания, а для пластилина – форма и размеры каверны. Установлено, что если диаметр цилиндрической мишени из пластилина превосходит пять диаметров каверны на входе, то результаты проникания будут одинаковые для пластилина со свободной боковой поверхностью и запрессованного в стальную трубу. Длина цилиндра при этом должна существенно превосходить глубину проникания. В таком случае глубина проникания не будет зависеть и от граничных условий на тыльной поверхности. Т.е. размеры мишени как

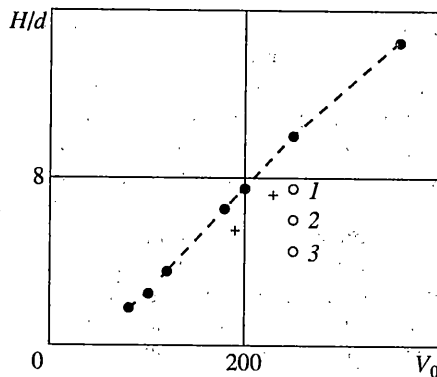
значении безразмерного параметра $2\tau_s / \rho v_0^2 C_x = 2.8 \cdot 10^{-5}$ (здесь ρ – плотность пластилина, C_x – коэффициент сопротивления шара). Глубина проникания в пластилиновый блок, предварительно пластически сформированный как описано, больше, чем в полупространство при той же начальной скорости. Это, очевидно, связано с наличием в среде остаточных напряжений растяжения. Близость свободной тыльной стороны мишени приводит к проявлению влияния отраженной от нее волны, возникающей при проникновении тела. Отраженная волна – волна растяжения. В некоторой точке шар попадает в зону ее действия, что и приводит к увеличению глубины проникания. Очевидно, мишень в виде слоя со свободной тыльной поверхностью будет пробита при скорости удара меньшей, чем скорость, при которой произойдет проникание в полупространство на глубину, равную толщине слоя. С другой стороны, зная скорость, при которой пробивается некоторый слой, можно утверждать, что проникание в полупространство из этого же материала будет меньше толщины слоя при той же начальной скорости. Например, при температуре 14°C слой пластилина толщиной 9 диаметров шара пробивается при скорости соударения 294 м/с. Глубина проникания в полупространство с этой же начальной скоростью составляет 8.3 диаметра.

Были проведены эксперименты с пластилином в виде отдельных слоев, расположенных на расстоянии полтора диаметра шара друг от друга. Первые два слоя толщиной полтора диаметра шара, затем слой толщиной 2 и 2.7 диаметра и еще слой толщиной в 4 диаметра. При начальной скорости входа 300 м/с (в случае полупространства) проникание при температуре пластилина 15°C равно 9 диаметрам шара. В разделенный на слои пластилин суммарная глубина проникания 9.7 диаметра фактически совпадает с глубиной проникания в сплошной слой пластилина примерно той же общей толщины 12 диаметров. Близость результатов в последних двух случаях, возможно, случайная. Но то, что разделение на слои не приводит к существенному изменению пути движения шара в пластилине по сравнению с его прониканием в полупространство из пластилина можно объяснить тем, что появление дополнительных тыльных поверхностей частично компенсируется появлением стольких же поверхностей входа, при соударении с которыми возникают повышенные ударные нагрузки. Необходимо так же отметить, что в первом слое наблюдался откол пластилина с его тыльной поверхности. Это снижало влияние на движение в этом слое волны разгрузки. Кроме того, на поверхности входа во второй слой оседал пластилин, оторвавшийся от первого слоя, и сквозь этот увеличенной толщины слой проходил шар. Таким образом, суммарный эффект разрывов в этом случае оказался почти равен влиянию на глубину проникания тыльной поверхности мишени при выбранной ее толщине и начальной скорости. Еще одна особенность проявляется при проникании в расслоенный пластилин. При соударении с полупространством диаметр каверны на входе всегда больше, чем при пробитии слоя. И чем тоньше слой, тем ближе диаметр отверстия на входе к диаметру шара. Например, в рассматриваемом случае в первом слое диаметр отверстия равен примерно диаметру шара, во втором – 1.1, а в остальных – 0.85. В этих условиях в полупространстве образуется каверна, диаметр которой на входе составляет 1.5 диаметра шара. В опыте, где первый слой был толщиной 4 диаметра шара, второй 5, а дальше – полупространство (при прежнем расстоянии между слоями), путь движения в пластилине составил 9.5, а размер каверны на входе 1.1 диаметра шара, что все еще значительно меньше, чем в полупространстве. При этом откола в первом слое не наблюдалось.

Влияние динамических напряжений сжатия на проникание исследовалось с помощью снарядов, состоящих из цилиндра диаметром 30 мм, с луночкой глубиной 5 мм на переднем торце, в которую вставлялся стальной шарик диаметром 10 мм. Цилиндрический стакан, изготовленный из магниевого сплава, имел массу 20 г., цилиндр из алюминиевого сплава – 57.4 г. Выстрелы производились на пневмопушке калибром 30 мм. При массе цилиндра 20 г его удельная массовая нагрузка на площадь поперечного сечения, даже за вычетом площади диаметрального сечения шара,



Фиг. 2



Фиг. 3

в 1.6 раза меньше, чем у шарика. К тому же коэффициент сопротивления сферы гораздо меньше, чем диска. Поэтому после соударения со свободной поверхностью шарик отделялся от цилиндра и уходил вперед, двигаясь при этом в среде, сжатой волной, возникающей от удара цилиндра о поверхность пластилина и движения в нем. При массе цилиндра 57.4 г не происходит отделения шарика, и он движется вместе с цилиндром до остановки. Результаты этой серии опытов представлены на фиг. 2. Здесь температура пластилина 25.5°C, при которой константа пластичности в динамике составляет $2 \cdot 10^5$ Па. Темными точками отмечена глубина проникания шара в полупространство, крестиками – при стрельбе с поршнем массой 20 г, кружочками – при массе поршня 57.4 г. По осям координат, как и на фиг. 1, начальная скорость и глубина проникания. Видно, что чем выше скорость соударения, а значит интенсивнее напряжения в волне сжатия, охватывающей шарик, тем больше разница между глубиной проникания в свободный и сжатый пластилин. В то же время при некотором значении массы цилиндра не происходит его разделение со сферой, и они движутся как одно тело, имея обтекаемую поверхность, состоящую из полусферы в центре и диска в три раза большего диаметра. В нашем случае это приводит к тому, что такое тело проникает на ту же глубину, что и свободный шарик. Для этого, очевидно, необходимо, чтобы отношение его параметров m/SC_x (где m , S , C_x соответственно масса, площадь миделя и коэффициент сопротивления) было близко к отношению этих же параметров для шара.

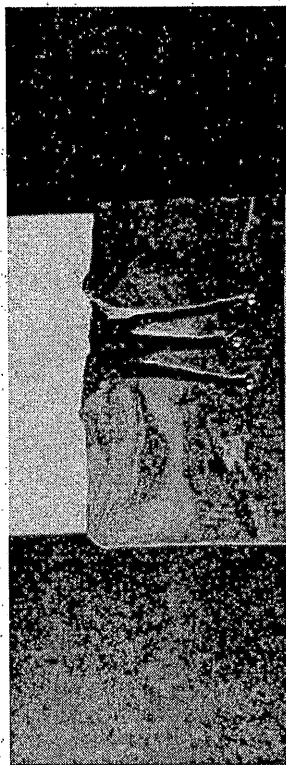
Были проведены эксперименты, когда на поверхность пластилина со стороны выстрела помещалась стальная плита толщиной в два диаметра шара с отверстием 1.4 диаметра, через которое и происходило проникание. Результаты представлены на фиг. 3. По осям координат также скорость и глубина проникания. Температура пластилина 18°C, что дает $\tau_s = 6.5 \cdot 10^5$ Па. Темные точки – проникание в полупространство, кресты – в пластилин с плитой на поверхности. Так как плита стесняет движение пластилина, а значит вызывает развитие дополнительных сжимаемых напряжений при проникании шара, то глубина проникания шара в этом случае меньше, чем в полупространство. Но поскольку плита не движется за шаром как в случае стрельбы цилиндром с шаром, разница в глубинах не столь велика.

На фиг. 3 светлыми точками с цифрами отмечены результаты проникания шара, когда выстрел производился группой шаров. В этом случае шары диаметром 9.5 мм укладывались плотно друг к другу послойно (по 7 в слое, один в центре – шесть вокруг) в деревянный стакан диаметром 30 мм. Деревянный стакан был настолько тонким и легким, что при ударе о пластилин разрушался на мелкие части и почти не оставлял следов на его поверхности. Данные, нанесенные на фиг. 3, относятся к центральному шару. Цифра 1 отмечает результат стрельбы одним слоем, 2 – двумя,

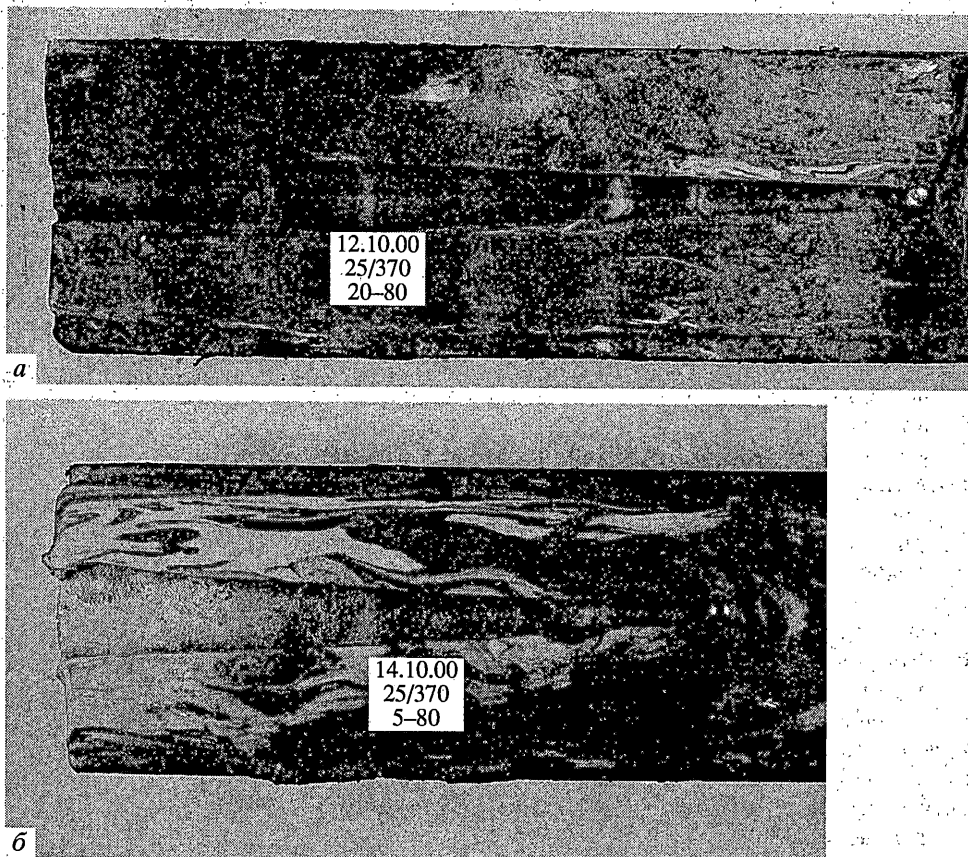
3 – четырьмя. Полученная в эксперименте глубина отнесена к единичной массе и диаметру шара. Здесь проявляется влияние не глубины проникания не только волны сжатия, возбуждаемой движением соседних шаров, но и движения среды, вызванного их прониканием в непосредственной близости от центрального шара. Для центрального шара поле напряжений и встречное движение среды – осесимметрично, для периферийных – нет. Поэтому центральные шары движутся прямолинейно, а периферийные – по криволинейной траектории от центрального шара. Фотография разреза пластилина по оси каверны, образовавшейся при стрельбе шариками, уложенными в один слой, показана на фиг. 4. Здесь следует отметить не только удаление периферийных шариков от центрального, но и то, что они проникают глубже его, так как движутся в среде, которая менее напряжена, чем в зоне центрального шара. Эта разница увеличивается с увеличением числа слоев.

Серия опытов была проведена таким образом, что в свободной поверхности пластилина делалась скважина цилиндрической формы с плоским дном. В эту скважину производился выстрел шаром. Рассматривалось влияние диаметра скважины и ее глубины на глубину проникания и форму каверны. Результат таков, что при диаметре скважины больше двух диаметров шара на глубину проникания, отсчитываемую от ее дна, не влияет расстояние дна скважины от свободной поверхности, и она совпадает с глубиной проникания в полупространство. Форма каверны отличается от каверны, образующейся в полупространстве, лишь на расстоянии от дна скважины, равном примерно двум диаметрам шара. При диаметре скважины $0.5 d$ глубина проникания отсчитывается от свободной поверхности. Если проникание больше глубины скважины, то оно почти не отличается от проникания в полупространство. Почти совпадают при этом и формы каверны. Но при длине скважины больше $2d$ стенки каверны не везде гладкие, на них видны следы от прорыва воздуха, сжимаемого погружающимся телом. При диаметре скважины, равном d , сжимаемый в ней при движении шара воздух оказывает заметное сопротивление его движению, что приводит к снижению скорости соударения о дно скважины, хотя шар не касается ее стенок. Например, при длине скважины $8d$ и скорости входа шара в нее 300 м/с глубина проникания, отсчитываемая от дна скважины, становится заметно меньше глубины проникания в полупространство с той же начальной скоростью. Отличие каверн и в этом случае, как и в первом, от их форм при проникании в полупространство состоит в отсутствии всплеска и образовании узкой горловины в точке соударения о дно скважины. Формы каверн, образующихся при начальной скорости 370 м/с, температуре пластилина 25°C , длине скважин $8d$ и их диаметре $2d$ и $0.5 d$ показаны на фиг. 5 а; б соответственно.

Опыты с песком. Опыты с песком выявили следующую характерную особенность. Чтобы получить зависимость глубины проникания от скорости соударения с небольшим разбросом необходимо соблюдать стандартную процедуру подготовки мишени к выстрелу. Если за основу взят первый выстрел в только что засыпанный в контейнер песок, доведенный определенным образом до конкретной плотности, то следующие выстрелы должны готовиться точно так же, т.е. начинаться с засыпки заново контейнера. Если же при одной и той же скорости соударения проводить подряд несколько экспериментов, но после каждого песок не высыпать из контейнера, а, удалив из песка шарик, лишь засыпать образовавшуюся лунку, то глубина проникания будет



Фиг. 4

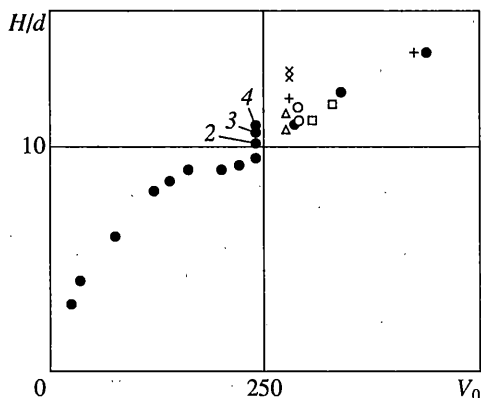


Фиг. 5

каждый раз увеличиваться, пока после шести – семи выстрелов результаты не стабилизируются. Необычность поведения песка возможно связана с тем, что в результате проникания в нем остаются такие напряжения и деформации, которые облегчают повторные движения такого же типа, возникающие при следующем проникновении. Т.е. песок обладает своего рода "памятью". И это является заметным возмущающим фактором для проникания. Необычность поведения песчаной среды проявляется заметно и при исследовании явления рикошета [4].

Для количественной иллюстрации свойства "памяти" песчаной среды представлена фиг. 6. По осям координат, как и раньше, начальная скорость и глубина проникания, отнесённая к диаметру шара. Темные точки – проникание в свободный от возмущений песок, темные точки, отмеченные цифрами, определяют порядковый номер выстрела в песок, который после предыдущего эксперимента не перемещивался и не готовился заново, как при первом выстреле. Видно, что при каждом последующем выстреле глубина проникания возрастает, и это заметно даже при четвертом выстреле.

Как и в случае пластилина, были проведены опыты, когда в песке со стороны свободной поверхности создавалась скважина, в которую производился выстрел. Песок удерживался от осыпания с помощью полиэтиленовой трубочки внутренним диаметром $3d$ и толщиной стенки $0.5d$. Снизу трубочка закрывалась полиэтиленовой пленкой толщиной $0.01d$. В связи со своеобразным поведением песчаной среды изменялась не только глубина скважины, но и способ ее подготовки. В одном случае в подготовлен-



Фиг. 6

ный песок перед выстрелом вдавливалась на нужную глубину трубочка. В другом трубочка засыпалась на нужную глубину, а затем песок уплотнялся, как обычно с погруженной в него трубочкой. Результаты представлены на фиг. 6. Косой крест – при вдавливании трубочки на $5d$, светлые точки – трубочка засыпана на $5d$, прямой крест – трубочка вдавлена на $3d$, светлые треугольники – трубочка вдавлена на $10d$, светлые квадраты – трубочка засыпана на $10d$. Видно, что вдавливание приводит к увеличению глубины проникания, и это особенно заметно при вдавливании до $5d$. (Глубина проникания измеряется от дна скважины). При больших глубинах вдавливания его влияние уменьшается, так как тело начинает двигаться на большей глубине, где песок более уплотнен весом верхних слоев, а известно, что его прочностные свойства сильно зависят от уплотнения и давления. Это подтверждается результатами проникания через скважину, образованную без вдавливания. В этом случае проникание чуть меньше, чем через свободную поверхность, т.е. оно начинается в более прочном песке.

Изю всех этих результатов следует, что в условиях проникания в среду типа песка не всегда сохраняются свойства однородности и изотропности.

Отметим еще одну особенность поведения песка при проникании в него через скважину. Если в пластине при глубине скважины больше $2d$ и диаметре больше $1d$ всплеск на поверхности отсутствует вплоть до скоростей соударения 350 м/с, то в песке при скорости соударения 300 м/с и глубине скважины до $5d$ происходит сильный выброс песка с поверхности. При такой скорости нет выброса при глубине скважины более $10d$. Но при скорости входа 430 м/с снова возникает выброс и при такой глубине скважины.

Заключение. Глубина проникания тела в полупространство, свободное от напряжений, не связанных непосредственно с движением тела, будет больше или меньше глубины проникания в полупространство, в котором или предварительно существовали или возникали дополнительно при проникании напряжения сжатия или растяжения, соответственно. Различие проявляется независимо от взаимной ориентации траектории движения тела и поля напряжений, но зависит от их величины. Параллельное и одновременное проникание нескольких тел существенно снижает глубину проникания каждого из них по сравнению с глубиной проникания отдельного тела. При этом траектория движения конкретного тела остается прямолинейной лишь в случае симметрии дополнительного поля возмущений для него. При наличии скважины на свободной поверхности полупространства диаметром, большим двух диаметров шара, его глубина проникания, отсчитываемая от дна скважины, совпадает с глубиной проникания в полупространство и не зависит от глубины скважины. При диаметре скважины

менее 0.5 диаметра шара ее диаметр и глубина фактически не изменяют глубины проникания, отсчитываемой от свободной поверхности, и она остается равной глубине проникания в полупространство. В случае проникания в песок обнаружен эффект "памяти" в этой среде, который может привести к отличию в глубинах проникания, соизмеримому с влиянием возмущающих факторов, аналогичных исследованным для пластилина. Особенности проявления прочностных характеристик песка, по-видимому, не всегда позволяют представлять его как однородную изотропную среду.

Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 99-01-01265).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Backman M.E., Goldsmith W.* The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets // Intern. J. Engng Sci. 1978. V. 16. № 1. P. 1–99.
2. *Johnson W., Daneshi G.H.* The Trajectory of Projectile when Fired Parallel and Near to the Free Surface of a Plastic Solid // Intern. J. Mech. Sci. 1978. V. 20. № 4. P. 255–263.
3. *Бивин Ю.К.* Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды // Изв. АН РАН. МТТ. 2001. № 3. С. 112–122.
4. *Бивин Ю.К.* Косой удар твердого тела о грунт или воду // Изв. АН СССР. МТТ. 1989. № 6. С. 185–189.
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
30.03.2000