

УДК 539.3

© 2001 г. В.Г. БАЖЕНОВ, В.Л. КОТОВ, А.В. КОЧЕТКОВ,
С.В. КРЫЛОВ, В.Р. ФЕЛЬДГУН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТОВОЙ СРЕДЕ ПРИ ВЗРЫВЕ НАКЛАДНОГО ЗАРЯДА

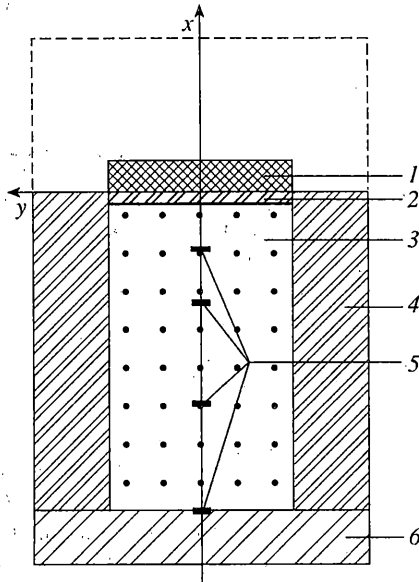
В настоящее время имеется значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию свойств мягких грунтов при взрывном нагружении [1–7]. Имеется ряд экспериментальных методик определения ударных адиабат мягких грунтов [2–4,7]. Однако полученные результаты в значительной мере противоречивы, и требуются дальнейшие исследования как базовых свойств мягких грунтов, так и углубленное теоретическое обоснование самих экспериментальных методов. В данной работе представлены результаты численного исследования воздействия накладного заряда ВВ на песчаный грунт через металлическую пластину-ударник. Грунт моделируется сжимаемой средой С.С. Григоряна [8] с необратимыми объемными и сдвиговыми деформациями. Численные решения, полученные при использовании различных ударных адиабат, известных в научной литературе, сравниваются с экспериментальными данными. В результате исследований предлагается синтезированная ударная адиабата песка, обоснованная в диапазоне от малых давлений до 1 ГПа. Анализируется влияние объемных пластических деформаций и сил трения на волновые процессы в грунте.

1. Постановка задачи. Моделирование процессов распространения волн, создаваемых зарядом ВВ в насыпном песке, проводилось в осесимметричной постановке, изображенной на фиг. 1 и соответствующей условиям проведения экспериментов [1].

Осесимметричная задача формулируется в цилиндрической системе координат xOy . Ось Ox является осью симметрии и проходит через центры дисков ВВ и ударника, ось Oy проходит перпендикулярно к ней вдоль поверхности ВВ. Система уравнений, описывающая динамику грунтовой среды, выглядит следующим образом [8–10]:

$$\begin{aligned}
 (\rho)_{,t} + (\rho u)_{,x} + (\rho v)_{,y} &= -(\rho v) / y \\
 (\rho u)_{,t} + (\rho u^2 - \sigma_{xx})_{,x} + (\rho u v - \sigma_{xy})_{,y} &= -(\rho u v - \sigma_{xy}) / y \\
 (\rho v)_{,t} + (\rho u v - \sigma_{xy})_{,x} + (\rho v^2 - \sigma_{yy})_{,y} &= -(\rho v^2 - \sigma_{yy} - \sigma_{\theta\theta}) / y \\
 (\rho \rho^*)_{,t} + (\rho \rho^* u)_{,x} + (\rho \rho^* v)_{,y} &= -(\rho \rho^* v) / y \\
 D_J s_{xx} + \lambda s_{xx} &= 2G(2u_{,x} - v_{,y} - v / y) / 3 \\
 D_J s_{xy} + \lambda s_{xy} &= G(u_{,y} + v_{,x}) \\
 D_J s_{yy} + \lambda s_{yy} &= 2G(2v_{,y} - u_{,x} - v / y) / 3
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

Принятые обозначения: t – время, ρ – плотность, u, v – компоненты вектора скорости



Фиг. 1

в направлении осей x , y соответственно, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, s_{ij} – компоненты дивергента тензора напряжений; ($i, j = x, y, \theta$), D_j – производная Яумана по времени, G – модуль сдвига. Символ после запятой обозначает дифференцирование по соответствующей переменной. Четвертое уравнение учитывает перенос "истории нагружения" материальной частицы, и ρ^* – максимальная плотность, достигнутая в процессе активного нагружения грунта. Параметр λ может принимать значения $\lambda = 0$ при упругом деформировании и $\lambda > 0$, если реализуется условие пластичности. Критерий сдвиговой пластичности для частиц грунта задается соотношением Мизеса [5]:

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} = \frac{1}{3} \left(Y_0 + \frac{\mu p}{1 + \mu p / (Y_{PL} - Y_0)} \right)^2 \quad (1.2)$$

где p – давление, Y_0 , μ , Y_{PL} – константы среды. Соотношения между давлением и объемной деформацией $\varepsilon = 1 - \rho_0/\rho$ или плотностью в грунте принимаются в виде

$$p = \begin{cases} f_H(\rho), & dp/dt > 0 \\ f_P(\rho, \rho^*), & dp/dt \leq 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Первое уравнение в (1.3) представляет собой ударную адиабату (УА), а второе уравнение определяет кривые разгрузки от достигнутой максимальной плотности ρ^* . Соответствующее ей максимальное давление, до которого была сжата рассматриваемая частица в процессе нагружения; определяется как $p^* = f_H(\rho^*)$. Если после нагружения до давления p^* давление в частице начинает падать (идет процесс разгрузки), то связь между давлением и плотностью описывается вторым уравнением в (1.3). Если после такого падения давление вновь начинает возрастать (догрузка), не превышая при этом p^* , то в этом случае связь между давлением и плотностью также дается вторым уравнением в (1.3). Если $\rho < \rho^*$, то реализуется разгрузочная ветвь уравнения состояния: Разгрузка среды описывается двухзвенной ломаной, рекомен-

дуемой авторами [5]:

$$p = \begin{cases} p^* + C_1^2(\rho - \rho^*), & p > p_{00} \\ p^* + C_2^2(\rho - \rho^*), & p < p_{00} \end{cases} \quad (1.4)$$

Здесь C_1 и C_2 – скорости звука, определяющие наклоны к оси p соответственно первого и второго звеньев ломаной (1.4); $p_{00} = p^*/\gamma_p$ характеризует отношение длин участков ломаных, (ρ_{00}, p_{00}) – точка излома кривой разгрузки в координатах (ρ, p) . Величины скоростей звука C_1 и C_2 как функции от ρ^* определяются следующим образом

$$C_1 = C_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{\rho_g - \rho_0} (C_g - C_0), \quad C_2 = C_1 \left(1 + \frac{1 - \gamma_c}{\gamma_c} \frac{\rho^* - \rho_0}{\rho_g - \rho_0} \right) \quad (1.5)$$

Параметр γ_c задает отношение C_1 к C_2 при $\rho^* = \rho_g$, где ρ_g – значение плотности, при достижении которого начинается обратимый (гидродинамический) участок диаграммы нагружения. В точке (ρ_g, p_g) наклон первого звена ломаной (1.4) совпадает с наклоном касательной к УА в (1.3). Таким образом, задается линейное изменение C_1 от C_0 до C_g и C_2 от C_0 до C_1/γ_c при изменении плотности ρ^* от ρ_0 до ρ_g . Здесь C_0 – скорость звука в грунте при отсутствии возмущений (или при $\rho = \rho_0$). Приведенные выше уравнения для описания свойств мягкого грунта соответствуют модели, предложенной С.С. Григоряном [8].

Для описания деформирования металлической пластины-ударника, обоймы и пластины (фиг. 1) используется та же система уравнений (1.1), за исключением уравнения для ρ^* . Критерием перехода из упругого напряженно-деформированного состояния в пластическое также является условие текучести (1.2), и принимается, что $Y_0 = \sigma_T$, $\mu = 0$, где σ_T – предел текучести.

Для расчета процесса взрыва используется модель мгновенной волновой детонации [6]. Распирение продуктов детонации (ПД) описывается первыми тремя уравнениями системы (1.1), а уравнением состояния служит баротропная зависимость

$$p = p_n(\rho/\rho_n)^\gamma \quad (1.6)$$

Здесь p_n, ρ_n – начальные давление и плотность в ПД, γ – показатель политропы. Термодинамические свойства атмосферного газа описываются уравнением (1.6) с тем же значением γ , что и ПД.

На поверхностях контакта грунта с пластиной, обоймой и плитой ставятся условия непроникания по нормали и проскальзывания с трением по касательному направлению. Закон трения принимается в форме Кулона

$$\sigma_\tau = k\sigma_n \quad (1.7)$$

где σ_τ, σ_n – касательное и нормальное напряжение на поверхности контакта, k – коэффициент трения. На других контактных поверхностях ставятся условия непроникания с идеальным проскальзыванием в касательном направлении.

В качестве начальных условий принимается, что все взаимодействующие среды (ПД, воздух, пластина, грунт, обойма и плита) в момент времени $t = 0$ находятся в состоянии покоя.

2. Метод решения и результаты расчетов. Для решения сформулированной выше физически и геометрически нелинейной задачи применяется явная разностная схема Годунова [11] первого порядка точности, сочетающая подходы Лагранжа и Эйлера к описанию движения сжимаемых сред. Модификация схемы для решения задач динамики сплошных упругопластических сред в произвольных подвижных разностных сетках описана в [9, 10].

Геометрические характеристики установки, представленной на фиг. 1, следующие.

Песок 3 заполняет толстостенную стальную трубу 4 (внутренний диаметр 75 мм, толщина стенок 40 мм, высота 120 мм), установленную на массивную стальную плиту 6. Грунт нагружается взрывом диска пластического ВВ 1 толщиной 4.5 мм. Между ВВ и пластиной помещена пластина-ударник 2 из алюминиевого сплава АМгб толщиной 2 мм. Расчет разлета ПД в атмосфере осуществляется в рамках одной области без выделения контактных границ. Размеры области атмосферного газа и ПД, ограниченной на фиг. 1 штриховой линией, принимаются: 300 мм по оси Oy и 1000 мм по оси Ox . На внешних границах области ставится условие $p = 0,1$ МПа. Расчетная область воздуха покрывается разностной сеткой с 1324 ячейками, область 1 – сеткой с 24 ячейками, сетки областей 2 и 3 состоят из 16 и 192 ячеек соответственно. Первые расчеты показали, что податливость обоймы 4 и плиты 6 практически не сказывается на параметрах волновых процессов в грунте, поэтому в дальнейших расчетах обойма и плита моделируются абсолютно жестким неподвижным телом и сеткой не покрываются. Предел текучести пластины принимается равным 126.5 МПа, модуль сдвига 27.5 ГПа, коэффициент Пуассона 0.3. Параметры ПД следующие: показатель политропы $\gamma = 3$, начальная плотность $\rho_n = 1.51$ г/см³, давление $p_n = 9.77$ ГПа. Начальная плотность атмосферного газа рассчитывается из (1.6) при $p = 0.1$ МПа. Начальная плотность грунта (смеси песка нарушенной структуры атмосферной влажности) $\rho_0 = 1.66$ г/см³. Константы Y_0, μ, Y_{PL} критерия текучести (1.2) равны соответственно 0.1, 0.8 и 15 МПа, модуль сдвига 150 МПа, коэффициент трения ν (1.7) равен 0.35 [12]. Параметры кривой разгрузки (1.4), (1.5) в расчетах: $\gamma_p = 3, \gamma_c = 3, C_0 = 30$ м/с, $\rho_g = 2.5$ г/см³.

Авторами эксперимента [1] пьезоэлектрическими датчиками давления 5 регистрировались нормальные напряжения в песке на расстоянии 20, 40, 80, 120 мм от ударника. Нормальное напряжение (σ_{xx} [МПа]) в отраженной от стальной плиты 6 волне измерялось датчиком давления, установленным в плите заподлицо с ее поверхностью (t [мкс]). Результаты эксперимента представлены на фиг. 2.

Численное моделирование ударно-волновых процессов в песчаном грунте осуществляется при использовании УА вида

$$D = A + Bv \quad (2.1)$$

связывающей скорость ударной волны D и скорость частиц за фронтом v . Зависимость (2.1) с помощью соотношений Гюгоню может быть преобразована к форме

$$p = \rho_0 A^2 \varepsilon / (1 - B\varepsilon)^2 \quad (2.2)$$

Константы УА (2.1), (2.2) экспериментально определялись авторами [3, 4, 7] в диапазоне изменения давления от 0.2 до 5 ГПа и принимают для смеси сухого песка следующие значения: $A = 500$ м/с, $B = 2.41$. Эта адиабата изображена линией с номером 1 на фиг. 3. Номером 2 обозначен кубический полином, аппроксимирующий результаты работы [1], отмеченные точками:

$$p = A_1 \rho^3 + A_2 \rho^2 + A_3 \rho + A_4 \quad (2.3)$$

Значения коэффициентов полинома (2.3) равны: $A_1 = 7827.108$; $A_2 = -36885.58$; $A_3 = 58533.55$; $A_4 = -31326.3$. Анализ результатов, полученных с использованием УА 1 и 2 показывает следующее. Результаты, рассчитанные с УА 1, как по фазам, так и по амплитудам соответствуют экспериментальным данным лишь в области высоких давлений (от 150 МПа и выше). Следует отметить, что и УА 1 получена наиболее достоверно в этом же диапазоне [3, 4, 7]. Использование варианта 2 дает менее точные результаты по характеру поведения импульса давления, если учесть, что используемый расчетный метод С.К. Годунова несколько "сглаживает" пиковые значения импульса. В третьем и четвертом датчиках, более удаленных от ударника (на 80 и 120 мм соответственно), расхождение численных результатов с экспериментальными

возрастает, в том числе и по фазам. Здесь, по-видимому, следует уточнить УА 1 в области давлений ниже 100 МПа. Расчет с использованием УА 2, предложенной в [1], привел к сильно заниженным амплитудам напряжений в проходящих импульсах первых трех датчиков, но удовлетворительному соотношению для амплитуд отраженных волн. Возможно, к этому привел способ построения ударной адиабаты по данным эксперимента [1]. Датчиками, установленными в грунт, фиксируется напряжение в прошедшей и отраженной волне, но прошедшая волна представляет собой не только прямую волну сжатия, а результат взаимодействия волн сжатия и разгрузки. Таким образом, датчики фиксируют результат сложного неоднородного процесса распространения волн, образовавшихся при подрыве заряда ВВ и волн разрежения, идущих от свободной поверхности, в то время как УА должна характеризовать только процесс ударного сжатия среды.

В работе [13] приводится диаграмма нагружения, полученная по результатам измерения поля напряжений при взрыве в песчаном грунте, в диапазоне от 0.5 до 2 МПа для песка нарушенной структуры (кривая 3 на фиг. 3):

$$f_H(\rho) = M\epsilon^n, \quad M = 1.51 \text{ ГПа}, \quad n = 2.5 \quad (2.4)$$

Расчеты с использованием этой УА также дают неудовлетворительные результаты. Поэтому, далее в работе используется составная диаграмма нагружения, построенная следующим образом. В диапазоне давления от 0 до 2 МПа зависимость (2.4), от 0.2 ГПа и далее – УА (2.2). В интервале 2 МПа – 0.2 ГПа используется интерполирующий параметрический кубический полином в форме Безье [14] (кривая 4 на фиг. 3), обеспечивающий в узлах стыковки непрерывность скоростей звука (первой производной). Полином Безье выглядит следующим образом

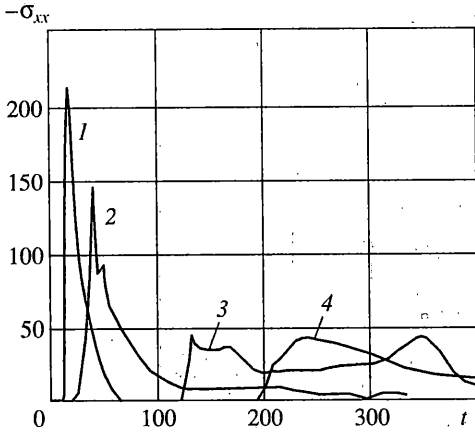
$$\mathbf{r}(w) = \{\rho(w), p(w)\} = (1-w)^3 \mathbf{r}_1 + 3w(1-w)^2 \mathbf{r}_2 + 3w^2(1-w) \mathbf{r}_3 + w^3 \mathbf{r}_4 \quad (2.5)$$

Данный полином в координатах (ρ, p) , характеризуется тем, что он при изменении параметра w от 0 до 1 проходит через точки (ρ_1, p_1) и (ρ_4, p_4) , а касательная в этих точках совпадает с прямыми, проведенными через точки (ρ_1, p_1) , (ρ_2, p_2) и (ρ_3, p_3) , (ρ_4, p_4) соответственно. Значения плотностей с индексами 2 и 3 записываются в виде

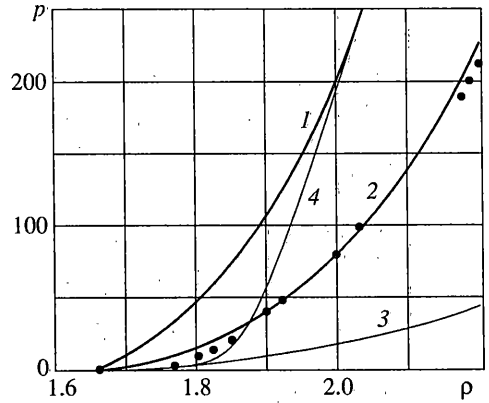
$$\rho_2 = 1 + \alpha \rho_1, \quad \rho_3 = 1 - \beta \rho_4 \quad (2.6)$$

а соответствующие давления находятся подстановкой значений плотностей в уравнения касательных. Уравнения касательных и значения полинома в опорных точках (ρ_1, p_1) и (ρ_4, p_4) вычисляются в соответствии с диаграммой (2.4) и (2.2). Таким образом однозначно определяются значения функции и значения ее производной. Конкретный вид функции (2.5), удовлетворяющих этим условиям, зависит от выбора α и β , причем подстановка этих констант в (2.6) должна обеспечивать по меньшей мере выпуклость и однозначность интерполирующего полинома. Для расчетов были выбраны следующие значения констант: $\alpha = \beta = 0.06$; $\rho_1 = 1.8 \text{ г/см}^3$, $\rho_4 = 2.1 \text{ г/см}^3$, результаты численного моделирования приведены на фиг. 4–6.

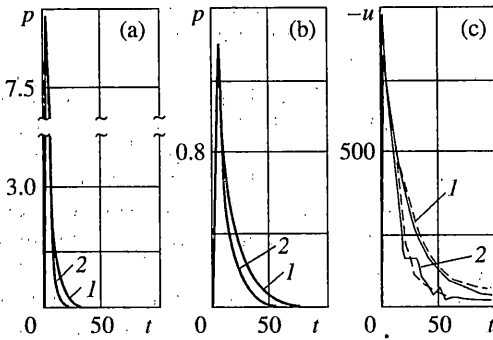
Специфику взрывного нагружения отражают приведенные на фиг. 4 импульсы давления p [ГПа] на пластину со стороны ПД (а), на пластину со стороны грунта (в) и скорости грунта и пластины u [м/с] в направлении оси $Ox(c)$ в точках с координатами $y = 0$ (кривая 1) и $y = R$ (кривая 2), где R – радиус пластины-ударника. На фиг. 4, с штрихами отмечены скорости точек грунта, сплошной линией – скорости точек ударника. Отличие в скоростях соответствующих точек песка и пластины говорит о возникающих кратковременных отрывах сред друг от друга. Некоторая разница в давлении и в скоростях в центре и на краю ударника возникает вследствие неоднородности поля напряжений и в газе и в грунте, усиливающейся со временем под влиянием неоднородного характера взрывного нагружения и сил трения. Численные эпюры напряжения, соответствующие экспериментальным, представлены на фиг. 5. Напряжения приведены в ячейках, положение которых в начальный момент времени



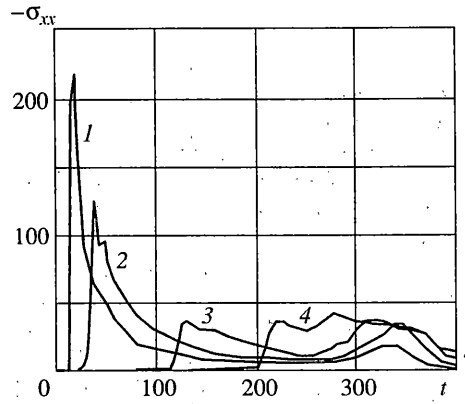
Фиг. 2



Фиг. 3



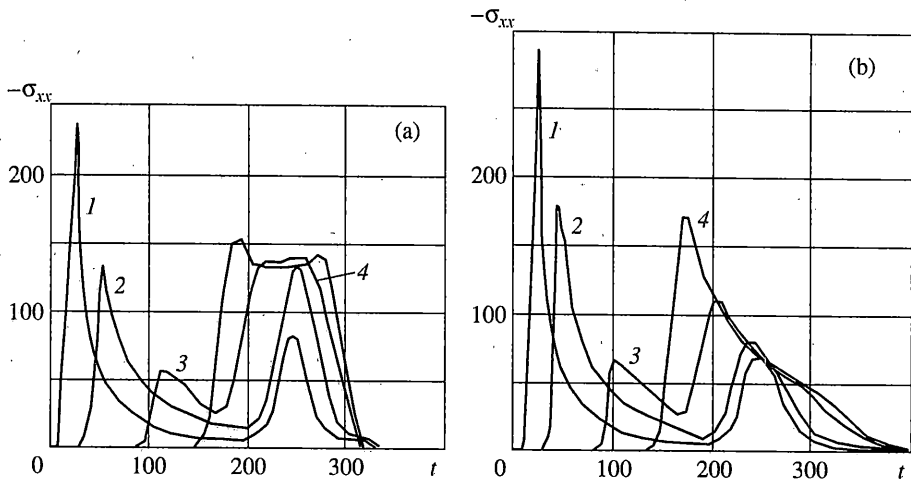
Фиг. 4



Фиг. 5

соответствует датчикам из эксперимента [1]. Исследование влияния сил трения в экспериментах подобного рода проводилось авторами [12], в этой же работе указаны значения динамических коэффициентов трения для различных взаимодействующих сред. Численный анализ влияния сил трения на амплитуды и фазы проходящих и отраженных импульсов сжатия показывает, что под действием сил трения амплитуды импульсов уменьшаются пропорционально глубине продвижения волны в грунт. Результаты численного расчета задачи без учета сил трения приведены на фиг. 6, а. Наибольшее различие наблюдается для отраженных импульсов, где амплитуды могут отличаться более чем в 3 раза (фиг. 5 и 6, а, кривая 4), а разница в фазах до 25%.

Как известно, важную роль в моделировании волновых процессов в грунте играет учет необратимых объемных деформаций. Так как взрывные импульсы нагружения характеризуются большим амплитудным значением при относительно малой длительности (фиг. 4), то действие разгрузки начинает сказываться практически сразу как на максимумах так и на фазах измеряемых импульсов сжатия. Для иллюстрации влияния объемной сжимаемости на параметры волн в грунте, на фиг. 6, в изображены расчетные кривые напряжения, полученные при моделировании грунта нелинейной жидкостью (т.е. не учитываются объемная пластичность и силы трения). Расчеты с использованием постоянной скорости звука при разгрузке не дают удовлетвори-



Фиг. 6

тельного соответствия результатам [1] по максимальному значению и форме импульса. В этом случае наблюдается более быстрое падение напряжения до нуля после набора второго максимума при прохождении отраженной волны.

Для оценки демпфирующих свойств пластины на амплитуды проходящих импульсов давления были проведены расчеты задачи в постановке, когда пластина-ударник отсутствовала, а заряд ВВ взаимодействовал непосредственно с грунтом. Максимумы напряжений в указанных точках несколько превышали (до 15%) приведенные на фиг. 5. Результаты моделирования пластинки идеально упругим или упругопластическим телом несущественно отличаются между собой, поэтому в практических задачах подобного типа можно использовать более простую модель.

3. Заключение. Решена в связанной постановке задача о совместном волновом движении системы "заряд ВВ – атмосфера – пластина-ударник – грунт – обойма". Показано, что использование модели С.С. Григоряна дает удовлетворительные результаты, соответствующие экспериментальным данным по амплитудным и временным характеристикам волн сжатия в рассматриваемом диапазоне нагружения. Построена синтезированная УА, позволяющая описывать сжатие песка во всем диапазоне взрывной нагрузки. Отмечено значительное влияние на волновые процессы трения грунта об обойму и необратимости объемной деформации мягкого грунта.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области горных наук и Программы поддержки ведущих научных школ России (грант 96-15-98156).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гердюков Н.Н., Иоилев А.Г., Новиков С.А. Исследование воздействия взрывных нагрузок на мягкий грунт // ПМТФ. 1992. № 2. С. 149–152.
2. Гердюков Н.Н., Иоилев А.Г., Новиков С.А., Чернов А.В. Исследование физико-механических характеристик песчаного грунта при динамическом нагружении. Препринт ВНИИЭФ № 12-92. М.: ЦНИИатоминформ. 1992. 21 с.
3. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // ПМТФ. 1963. № 1. С. 88–96.
4. Дианов М.Д., Златин Н.А., Мочалов С.М., Пугачев Г.С., Росомахо Л.Х. Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. Вып. 12. С. 529–532.

5. *Вовк А.А., Замышляев Б.В., Евтерев Л.С. и др.* Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984. 287 с.
6. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982. 286 с.
7. *Брагов А.М., Грушевский Г.М.* Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 12. С. 70–72.
8. *Григорян С.С.* Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Т. 24. Вып. 6. С. 1057–1072.
9. *Баженов В.Г., Козлов Е.А., Крылов С.В.* Численное моделирование нелинейных двумерных задач ударного взаимодействия деформируемых сред и конструкций на основе метода С.К. Годунова // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Исследование и оптимизация конструкций. Горький: Горьк. ун-т, 1990. Вып. 45. С. 99–106.
10. *Котов В.Л., Кочетков А.В., Крылов С.В.* Численное моделирование плоских задач взрыва в мягких грунтах с учетом динамики свободной поверхности // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Численное моделирование физико-механических процессов. М.: Тов. науч. изд. КМК, 1998. С. 102–110.
11. Численное решение многомерных задач газовой динамики // Под ред. С.К. Годунова. М.: Мир, 1976. 400 с.
12. *Гердюков Н.Н., Иоилев А.Г., Новиков С.А.* Определение динамического коэффициента трения песчаного грунта о жесткую стенку // ПМТФ. 1995. Т. 36. № 4. С. 185–187.
13. *Рыков Г.В.* Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте // ПМТФ. 1964. № 1. С. 85–89.
14. *Фокс А., Пратт М.* Вычислительная геометрия. М.: Мир, 1982. 304 с.

Н.-Новгород

Поступила в редакцию
28.05.1999