В.Г.БАЖЕНОВ, В.Л.КОТОВ, А.В.КОЧЕТКОВ
НИИ механики Нижегородского госуниверситета им Н.И.Лобачевского,
Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В МЯГКИХ ГРУНТАХ

Введение. В настоящее время имеется значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию свойств мягких грунтов при взрывном нагружении [4-7,10,12,13] и экспериментальных методик определения ударных адиабат мягких грунтов [4,7,10,12]. Однако полученные результаты в значительной мере противоречивы, и требуются как дальнейшие исследования 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 [9] 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 рис.1 и соответствующей условиям проведения экспериментов [6]. 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 взаимодействующих сред, приведена в работах [3,9,11] и включает уравнение неразрывности, уравнения движения, а также контактные и граничные условия. Замыкается система уравнениями состояния. Уравнение состояния грунтовой среды включает ударную адиабату (УА) и разгрузочная ветвь. Разгрузка среды описывается двухзвенной ломаной, рекомендуемой авторами [5] и примененной в [2]. Для расчета процесса взрыва используется модель мгновенной волновой детонации [13].

2. Метод решения и результаты расчетов. Для решения физически и геометрически нелинейной задачи применяется явная разностная схема Годунова [1] 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 работах [1,3,11].

Геометрические характеристики установки, представленной на рис.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 АМг6 толщиной 2 мм. Расчет разлета ПД в атмосфере осуществляется в рамках одной области без выделения

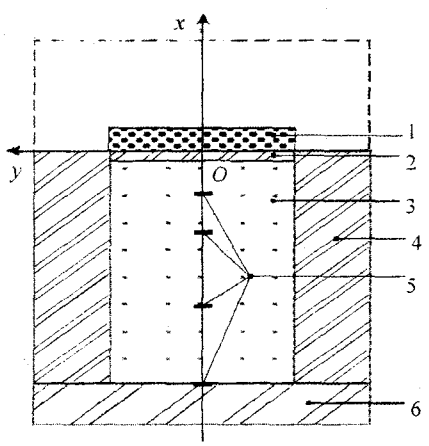


Рис.1

контактных границ. Размеры области атмосферного газа и ПД 1, ограниченной на рис.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 соответственно из 16 и 192 ячеек. 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/см^3, давление $p_n = 9{,}77$ ГПа. Начальная плотность атмосферного газа рассчитывается при $p = 0{,}1$ МПа. Начальная плотность грунта (смеси песка нарушенной структуры атмосферной влажности) $\rho_0 = 1{,}66$ г/см^3. Константы Y_0, μ, Y_{PL} критерия текучести равны соответственно 0,1 МПа, 0,8 и 15 МПа, модуль сдвига 50 МПа, коэффициент трения равен 0,35 [8]. Параметры кривой разгрузки [2] в расчетах: $\gamma_p = 3$, $\gamma_c = 3$, $C_0 = 30$ м/с, $\rho_g = 2{,}5$ г/см^3.

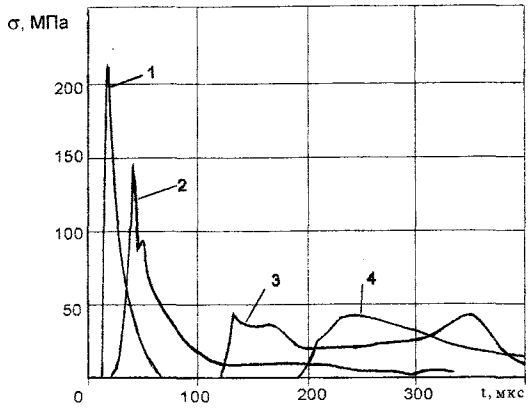


Рис. 2

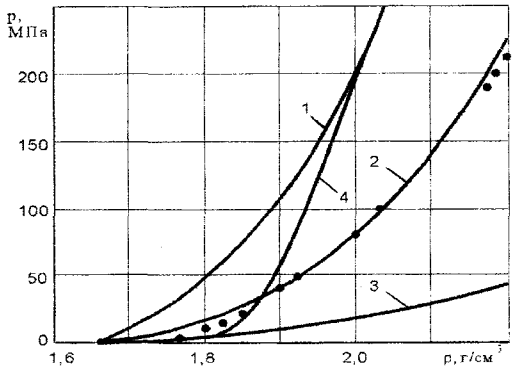


Рис. 3

Авторами эксперимента [6] пьезоэлектрическими датчиками давления 5 регистрировались нормальные напряжения в песке на расстоянии 20, 40, 80, 120 мм от ударника. Нормальное напряжение в отраженной от стальной плиты 6 волне измерялось датчиком давления, установленным в плите заподлицо с ее поверхностью. Результаты эксперимента представлены на рис.2.

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

$$D = A + Bu, \tag{1}$$

связывающей скорость ударной волны D и скорость частиц за фронтом u. Зависимость (1) с помощью соотношений Гюгонио может быть преобразована к форме

$$p = \rho_0 A^2 \frac{\varepsilon}{(1 - B\varepsilon)^2}. \tag{2}$$

Константы УА (1), (2) экспериментально определялись авторами [4,10,12] 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 кривой 1 на рис.3. Номером 2 обозначен кубический полином, аппроксимирующий результаты работы [6], отмеченные точками:

$$p = A_1 \rho^3 + A_2 \rho^2 + A_3 \rho + A_4, \tag{3}$$

где коэффициенты полинома $A_1 = 782{,}7108$; $A_2 = 3688{,}558$; $A_3 = 5853{,}355$; $A_4 = 3132{,}63$; размерность давления – мегапаскали, плотности – граммы на кубический сантиметр.

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 [4,10,12]. 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 [11]. В данной задаче существенное влияние на параметры волн оказывают силы трения грунта о поверхность обоймы. Исследование влияния сил трения в экспериментах подобного рода проводилось авторами [8], 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. Как показывают расчеты, наибольшее различие наблюдается для отраженных импульсов, где амплитуды могут отличаться более чем в 3 раза, а разница в фазах до 25 %.

Как известно, важную роль в моделировании волновых процессов в грунте играет учет необратимых объемных деформаций. Поскольку взрывные импульсы нагружения характеризуются большим амплитудным значением при относительно малой длительности, действие разгрузки начинает сказываться практически сразу как на максимумах, так и на фазах измеряемых импульсов сжатия. Для исследования влияния объемной сжимаемости на параметры волн в грунте проводился расчет, в котором грунт моделировался нелинейной жидкостью (не учитываются объемная пластичность и силы трения). Для всех четырех датчиков максимальные численные значения отличаются от экспериментальных: от 50 % для проходящих до 300 % для отраженных импульсов давления. Наблюдается также некоторое изменение времени прихода импульса в датчик. Расчеты с использованием кривой разгрузки в виде двузвенной ломаной с изменяющимся углом наклона обеспечивают качественное подобие формы отраженного импульса. При постоянной скорости звука наблюдается более быстрое, чем в эксперименте, падение напряжения до нуля после набора второго максимума при прохождении отраженной волны.

Сдвиговые свойства грунта в данном диапазоне нагрузки сказываются слабо, что следует из расчетов с различным модулем сдвига грунта и варьирования констант предела текучести. Расчет с использованием УА 2, предложенной в [6], с учетом сил трения и объемной разгрузки привел к сильно заниженным амплитудам напряжений в проходящих импульсах первых трех датчиков. Возможно, к этому привел способ построения ударной адиабаты по данным эксперимента [6]. Датчиками, установленными в грунт, фиксируется напряжение в прошедшей и отраженной волне, но прошедшая волна представляет собой не только прямую волну сжатия, но результат взаимодействия волн сжатия и разгрузки. Таким образом, датчики фиксируют результат сложного неодномерного 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 [11].

В работе Г.В.Рыкова [14] 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 рис.3):

$$f_H(\rho) = M\varepsilon^n, \quad M = 1{,}51 \text{ ГПа}, \quad n = 2{,}5. \tag{4}$$

Расчеты с использованием этой УА также дают неудовлетворительные результаты. Поэтому далее в работе исследуется составная диаграмма нагружения, построенная следующим образом: в диапазоне давления от 0 до 2 МПа – зависимость (4), от 0,2 ГПа и далее – УА (2). В интервале 2 МПа – 0,2 ГПа используется интерполирующий параметрический кубический поли-

ном в форме Безье [2] (кривая 4 на рис.3), обеспечивающий в узлах стыковки непрерывность скоростей звука (первой производной). Полином Безье выглядит следующим образом:

$$r(w)=\{\rho(w),\ p(w)\}=(1-w)^3 r_1+3w(1-w)^2 r_2+3w^2(1-w)r_3+w^3 r_4. \qquad (5)$$

В координатах (ρ, p) и при изменении параметра w от 0 до 1 данный полином 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

$$\rho_2=1+\alpha\rho_1, \quad \rho_3=1-\beta\rho_4, \qquad (6)$$

а соответствующие давления находятся подстановкой значений плотности в уравнения касательных. Уравнения касательных и значения полинома в опорных точках (ρ_1, p_1) и (ρ_4, p_4) вычисляются в соответствии с диаграммами (4) и (2). Таким образом однозначно определяются значения функции и значения ее производной. Конкретный вид функций (5), удовлетворяющих этим условиям, зависит от выбора α и β, причем подстановка этих констант в (6) должна обеспечивать по меньшей мере выпуклость и однозначность интерполирующего полинома. Для расчетов были выбраны следующие значения констант: $\alpha = \beta = 0{,}06$, $\rho_1 = 1{,}8$ г/см^3, $\rho_4 = 2{,}1$ г/см^3.

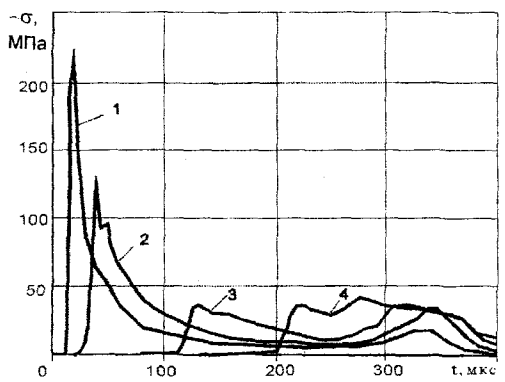


Рис. 4

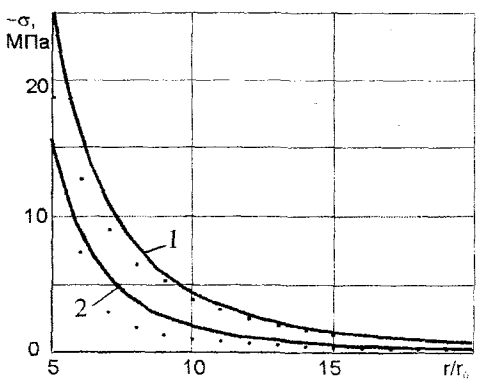


Рис. 5.

Результаты расчетов задачи с использованием синтезированной ударной адиабаты песка нарушенной структуры с учетом трения грунта о поверхность обоймы и объемной разгрузки изображены на рис.4. Напряжения приведены в ячейках, положение которых в начальный момент времени соответствует датчикам из эксперимента [6]. Видно, что использование составной УА дает удовлетворительные результаты, соответствующие экспериментальными данным по амплитудным и временным характеристикам волн сжатия в рассматриваемом диапазоне нагружения.

Для более полного тестирования составной ударной адиабаты был проведен расчет взрыва сферического заряда ВВ (ТНТ) в грунте. Результаты сравнения тестовых расчетов с известными экспериментальными данными Г.В.Рыкова [14] для песка различной структуры приведены на рис.5. Экспериментальные зависимости максимумов радиальных напряжений от расстояния, отнесенного к радиусу заряда ВВ, соответствуют песку ненарушенной структуры (кривая 1 на рис.5) и нарушенной (нижняя кривая) структуры. Результаты численных расчетов показаны точками и находятся в удовлетворительном соответствии с данными эксперимента. Некоторое занижение амплитуд напряжений вызвано аппроксимационной вязкостью используемой численной схемы. На расстояниях, бóльших пяти радиусов заряда ВВ, максимумы напряжений «размазываются» на несколько ячеек. Улучшение аппроксимации (использование более подробной сетки) приводит к большему соответствию результатов, но при этом время

счета значительно возрастает. В работе [14] отношение тангенциальных напряжений к радиальным (коэффициент бокового давления) изменялось в диапазоне 0,3-0,4. В численных расчетах требуемое отношение удовлетворяется при модуле сдвига 50-100 МПа для песка ненарушенной структуры и 20-40 МПа для песка нарушенной структуры естественной влажности

Заключение. Построена синтезированная УА, позволяющая описывать сжатие песка во всем диапазоне взрывной нагрузки. Результаты численных расчетов с использованием построенной УА соответствуют экспериментальным данным различных авторов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобразования РФ (грант по фундаментальным исследованиям в области горных наук), РФФИ (грант № 99-01-00132) и Программы поддержки ведущих научных школ России (грант 00-15-99029).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абузяров М.Х.* Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред / М.Х.Абузяров, В.Г.Баженов, В.Л.Котов и др. // ЖВМ и МФ. 2000. Т. 40. № 6.

2. *Баженов В.Г.* Анализ применимости модифицированного метода Кольского для динамических испытаний грунтовых сред в деформируемой обойме / В.Г.Баженов, А.М.Брагов, В.Л.Котов и др. // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3.

3. *Баженов В.Г.* Численное моделирование нестационарного взаимодействия деформируемых сред при импульсном и взрывном нагружении / В.Г.Баженов, В.Л.Котов, А.В.Кочетков и др. // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород: Сб. трудов международной научной конференции. 1998.

4. *Брагов А.М.* Влияние влажности и гранулометрического состава на ударную сжимаемость песка / А.М.Брагов, Г.М.Грушевский // Письма в ЖТФ. 1993. Т.19. Вып.12.

5. *Вовк А.А.* Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А.Вовк, Б.В.Замышляев, Л.С.Евтерев и др. Киев: Наукова думка, 1984.

6. *Гердюков Н.Н.* Исследование воздействия взрывного нагружения на мягкий грунт / Н.Н.Гердюков, А.Г.Иоивлев, С.А.Новиков // ПМТФ. 1992. № 2.

7. *Гердюков Н.Н.* Исследование физико-механических характеристик песчаного грунта при динамическом нагружении: Препринт ВНИИЭФ. № 12-92 / Н.Н.Гердюков, А.Г.Иоивлев, С.А.Новиков, А.В.Чернов. М.: ЦНИИатоминформ, 1992.

8. *Гердюков Н.Н.* Определение динамического коэффициента трения песчаного грунта о жесткую стенку / Н.Н.Гердюков, А.Г.Иоилев, С.А.Новиков // ПМТФ. 1995. Т. 36. № 4.

9. *Григорян С.С.* Об основных представлениях динамики грунтов // ПММ. 1960. Вып.4.

10. *Дианов М.Д.* Ударная сжимаемость сухого и водонасыщенного песка / М.Д.Дианов, Н.А.Златин, С.М.Мочалов и др. // Письма в ЖТФ. 1976. Т.2. Вып.12.

11. *Котов В.Л.* Численный анализ нагружения песчаного грунта взрывом накладного заряда / В.Л.Котов, А.В.Кочетков, С.В.Крылов, В.Р.Фельдгун//Вестник ННГУ, серия «Механика». 1999. Вып.1.

12. *Лагунов В.А.* Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях / В.А.Лагунов, В.А.Степанов // ПМТФ. 1963. № 1.

13. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. М.: Наука, 1982.

14. *Рыков Г.В.* Экспериментальное исследование поля напряжений при взрыве в песчаном грунте // ПМТФ. 1964. № 1.