

9. Бохан А. С., Куликов С. В., Лапичев Н. В. и др. Опыт обработки высокоскоростного метания стальных сферических элементов из ЛГУ // Воздействие мощных потоков энергии на вещество. М.: ИВТАН, 1992. С. 156–163.
10. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
11. Murnaghan F. D. Finite Deformation of Elastic Solid. NY, 1951.
12. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. VII Int. Symp. Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983. P. 541–547.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА ПРИ ВЗРЫВЕ ПЛАСТИНЫ ВВ ПО МЕТОДИКАМ ЭГАК И ТИМ

*А. В. Городничев^{1,2}, А. Г. Иошлев^{1,2}, А. А. Краюхин¹, В. Н. Мотлохов¹,
О. Н. Пронина¹, С. С. Соколов¹, Т. И. Чайка¹, Ю. В. Янилкин^{1,2}*

¹Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, г. Саров,
²СарФТИ НИЯУ «МИФИ», г. Саров

Важное место при изучении взрывных явлений занимает численное моделирование. Оно необходимо для прогнозирования механического действия промышленных взрывов, расчета развития воронки или каверны, распространения ударной и сейсмической волн. К мягким грунтам относят сильнотрещиноватые слабые породы с коэффициентом крепости до 1 как естественного сложения, так и насыпные: песок, глина, суглинок, аллювий, мергель и т. п., а также гравий и щебень [1, 2].

Сложность расчета распространения волн в мягком грунте связана с необходимостью применения сложных математических моделей динамического деформирования с большим количеством параметров. В качестве такой модели в настоящей работе выбрана упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта [2]. Подбор параметров модели обычно осуществляется на основании сравнения характеризующих взрывную волну физических величин, измеренных в опытах, проведенных в лабораторных и полевых условиях, и полученных в сериях одномерных расчетов, соответствующих по постановке экспериментам [2].

Упругопластическая релаксационная модель динамического деформирования мягкого грунта в 2003 году была введена нами в методику ЭГАК [3], предназначенную для проведения расчетов на эйлеровой сетке, и методику ТИМ [4], предназначенную для проведения расчетов на неструктурированной лагранжевой сетке.

В данной работе представлены результаты проведенных по методикам ЭГАК и ТИМ валидационных расчетов задачи о распространении взрывной волны и образовании взрывной полости в песке при взрыве, расположенной внутри массива грунта тонкой пластины химического ВВ. Для описания поведения песка в расчетах использовалась упругопластическая релаксационная модель деформирования мягкого грунта, для описания процесса взрывчатого превращения ВВ в ПВ и дальнейшего поведения ПВ использовалось УРС Зубарева [5].

Упруговязкопластическая релаксационная модель динамической сжимаемости мягкого грунта

Упругопластическая релаксационная модель динамической сжимаемости мягкого грунта [2] удовлетворяет основным требованиям к реологическому уравнению для мягких грунтов, а именно:

- запаздывание деформаций в развитии по отношению к изменению напряжений;
- существование предельной динамической и статической диаграмм нагружения;
- увеличение мгновенного модуля нагрузки на траектории деформирования с ростом скорости деформирования;
- объемная деформация складывается из обратимой и необратимой, необратимая объемная деформация зависит как от уровня нагрузки, так и от времени ее действия;
- модуль разгрузки существенно больше динамического модуля сжатия, ниже статической диаграммы давление-деформация он не зависит от скорости деформирования и соответствует скорости распространения звука;
- предел текучести зависит от давления.

Уравнения модели представляют собой нелинейную дифференциальную связь между давлением и объемной деформацией, применимую для широкого круга мягких грунтов (песок, супесь, суглинки, глина и т. д.), характеризующихся гранулометрическим составом, а значит размером пор и зерен, начальной плотностью и влажностью, упругими модулями. Траектория нагружения и разгрузки описывается разными соотношениями, что приводит к остаточным необратимым объемным деформациям уплотнения.

При описании деформации сдвига в рамках этой модели используется линейная упругопластическая модель с зависимостью предела текучести от давления.

В [2] предложены также корреляции для вычисления значений параметров модели, исходя из минимума информации: типа грунта, начальной плотности и влажности, скорости распространения продольных и поперечных волн, предела упругости грунта, иначе называемого пределом структурной прочности по давлению.

Описание экспериментов

Валидация модели в двумерном случае была проведена на результатах опыта по исследованию распространения взрывной волны в мягком грунте при взрыве заряда химического ВВ в виде пластины [6].

Рентгенограмма опытной сборки перед опытом приведена на рис. 1,а. Сборка состоит из кюветы с боковыми стенками из оргстекла толщиной 4 мм и стальным дном толщиной 2,7 мм, заполненной сухим песком (насыпная плотность $\rho_{00} = 1,54 \text{ г/см}^3$, при закладывании в кювету песок разравнивался и подтрамбовывался до плотности $\rho_{00} = 1,68 \text{ г/см}^3$). В песке параллельно дну кюветы расположены пластина из ВВ толщиной 2 мм, отделенная от песка лавсановой пленкой толщиной 0,2 мм, и реперные линии из медной фольги сечением 0,1 мм × 5 мм (сверху) и медной проволоки диаметром 1 мм (снизу). Толщины слоев сборки также приведены на рис. 1,а. Детонация в пластине ВВ возбуждалась одновременно по всему торцу с помощью электродетонаторов. Направление распространения детонации показано на рис. 1,а стрелкой.

Рентгенографирование проводилось в момент времени, соответствующий проходу детонационной волны практически до противоположного края сборки (для того, чтобы установилась двумерная картина движения песка и «забылись» условия инициирования и закрепления ВВ и реперных линий в левой стенке кюветы). Ширина сборки в направлении рентгенографирования 52 мм (из них по 4 мм приходится на боковые стенки кюветы из оргстекла). На рис. 1,б приведена рентгенограмма на момент времени 33,6 мкс после инициирования ВВ (после подачи высоковольтного импульса на электродетонаторы): хорошо заметны профили УВ и взрывной полости, а также смещение реперных линий.

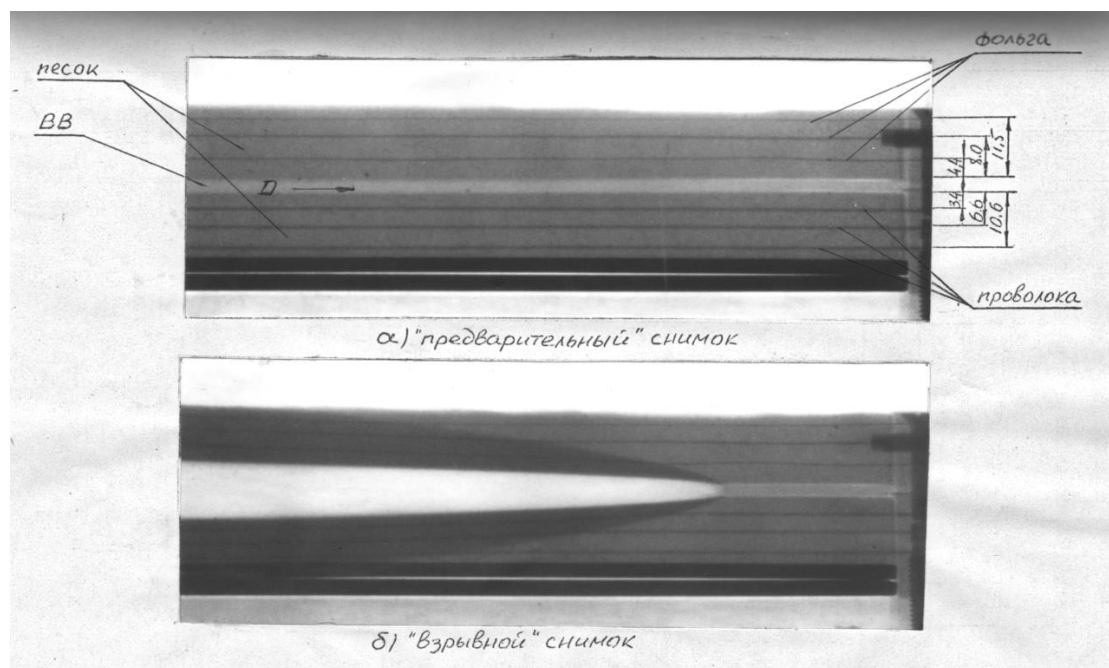


Рис. 1. Рентгенограммы опыта с пластинкой ВВ [6]: а – снимок перед опытом, б – снимок через 33,6 мкс после инициирования ВВ

В перспективе такой подход позволит получать в одном опыте увеличенный объем информации по прохождению УВ по грунту, а также по отражению УВ от жесткой поверхности (дно кюветы) и по движению свободной поверхности грунта при выходе на нее УВ.

Геометрия и особенности расчетов

Численное моделирование опыта по взрыву пластинки ВВ в песке проводилось по методикам ТИМ и ЭГАК в плоской постановке. На слой ВВ приходилось $N = 5, 10$ или 20 счетных ячеек. В силу малости толщины фольги и проволочек их влияние на решение не учитывалось. В расчетах, проведенных по методике ТИМ, использовалась неструктурированная четырехугольная лагранжевая счетная сетка. В расчетах, проведенных по методике ЭГАК – квадратная эйлеровая счетная сетка. Для описания процесса взрывчатого превращения ВВ в ПВ и дальнейшего поведения ПВ использовалось УРС Зубарева [5]. Для описания поведения песка использовалась модель Евтерева-Замышляева [2] с параметрами из таблицы.

Параметры модели Евтерева – Замышляева для песка

Параметр	Значение
Плотность ρ_0 , г/см ³	1,65
Влажность w	0
Предел упругости p_e , ГПа	10^{-4}
Показатель сжатия скелета γ_1	0,8628179
Модуль объемного сжатия скелета E_1 , ГПа	0,0010725
Динамический модуль объемного сжатия E_{d0} , ГПа	0,002842

Окончание таблицы

Параметр	Значение
Упругий модуль объемного сжатия K_{d0} , ГПа	0,035302
Показатель динамичности γ_{1r}	4
Статический модуль объемного сжатия E_{st0} , ГПа	0,000711
Начальный предел текучести Y_0 , ГПа	$3 \cdot 10^{-5}$
Максимальный предел текучести Y_1 , ГПа	0,05
Коэффициент упрочнения ξ	1
Коэффициент Пуассона ν	0,2975
Релаксационный параметр m	150
Релаксационный параметр a , $(10 \text{ мкс})^{-1}$	0,02
Релаксационный параметр b , ГПа $\cdot(10 \text{ мкс})^{-1}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$
Релаксационный параметр c , ГПа $\cdot(10 \text{ мкс})^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Релаксационный параметр α	1

Результаты расчетов

На рис. 2 приведены экспериментальная рентгенограмма и результаты расчетов опыта с пластиной ВВ. Видно, что качественно результаты расчетов ЭГАК и ТИМ хорошо согласуются как между собой, так и с экспериментальными данными: в расчетах, как и в опыте, хорошо видна область уплотненного ударной волной песка, а также смещение и сжатие областей грунта между реперными линиями. Визуально отличий между результатами расчетов на разных счетных сетках не наблюдается как для движения фронта ударной волны по песку, так и для течения грунта за фронтом ударной волны (смещение границ, имитирующих фольги, одинаковое).

На рис. 3 приведены расчетные ударная волна, граница каверны и реперные линии в сравнении с экспериментальными данными. Результаты расчетов ЭГАК практически не отличаются от результатов расчета ТИМ. Хорошее совпадение расчетной геометрии фронта ударной волны с экспериментальными данными говорит о том, что в расчетах правильно рассчитывается скорость взрывной волны в песке. По геометрии границы каверны - наоборот, в обоих расчетах получено заметное отличие от экспериментальных данных на расстоянии >2 см от положения фронта детонации в ВВ: в расчетах стенка каверны расширяется быстрее, чем в опыте, причем, с увеличением расстояния от фронта детонационной волны это различие увеличивается. При сравнении смещения первой реперной линии (фольга № 1) наблюдается аналогичная картина: в расчете эта линия движется с большей скоростью, чем в эксперименте, причем, с увеличением расстояния от фронта детонационной волны это различие возрастает. Смещение второй реперной линии (фольга № 2) в расчете неплохо совпадает с экспериментальными данными.

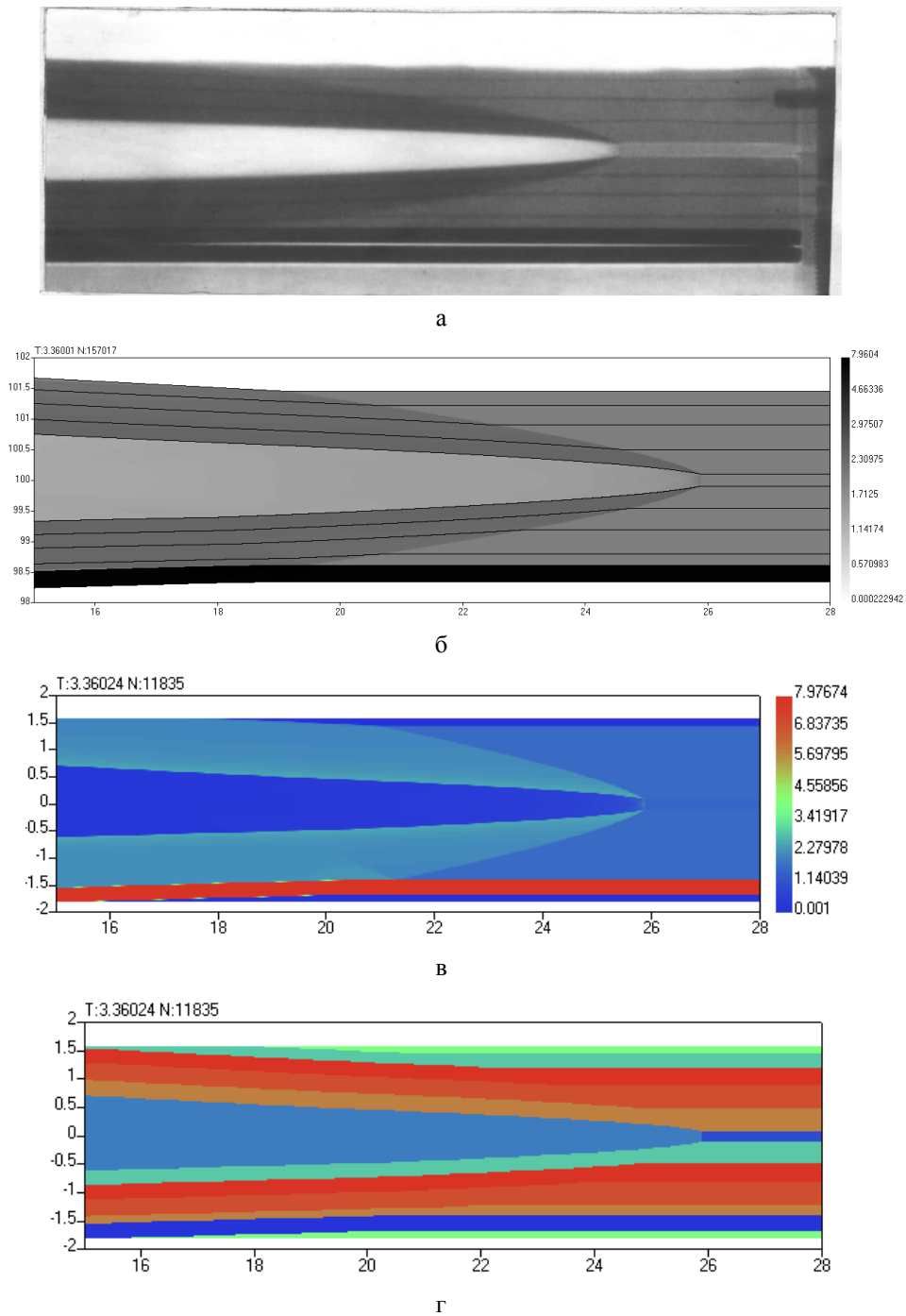


Рис. 2. Деформирование слоев песка на $t = 33,6$ мкс: а – рентгенограмма [6]; б – поле плотности, расчет ТИМ ($N = 20$); в, г – поле плотности и поле веществ, расчет ЭГАК ($N = 20$)

Одной из возможных причин того, что в расчетах геометрия (а значит и скорость) фронта УВ и массовая скорость сжатого грунта вблизи фронта УВ описываются хорошо, а при удалении от фронтов детонационной и ударной волн различие между массовыми скоростями грунта в расчете и опыте возрастает, могло стать разрушение в эксперименте боковой стенки кюветы из оргстекла толщиной 4 мм при детонации ВВ и последующий прорыв ПВ в атмосферу. В этом случае из-за падения давления внутри каверны расширение ее стенок должно замедлиться.

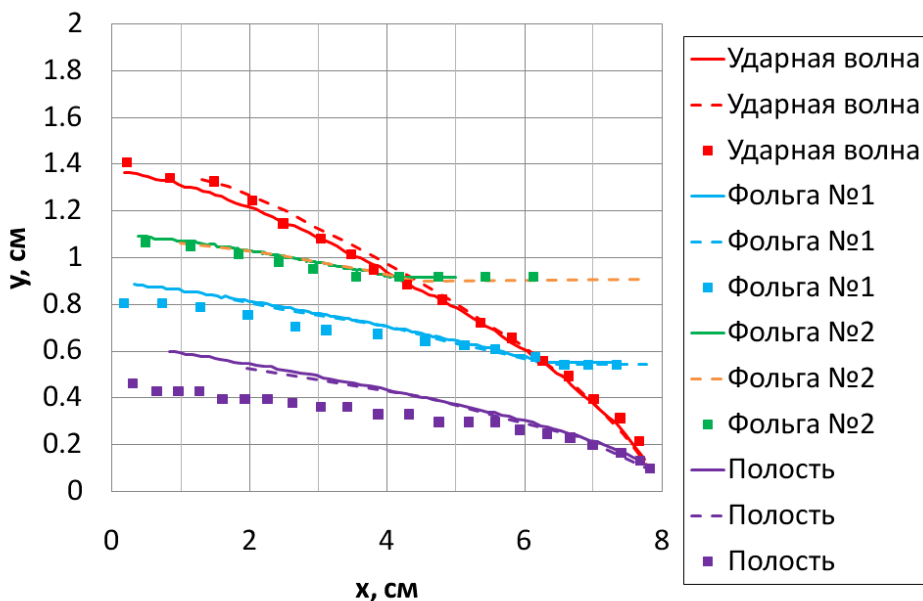


Рис. 3. Профили полости, ударной волны и фольг в опыте (точки) и расчетах: сплошная линия – расчет ТИМ ($N = 10$), пунктир – расчет ЭГАК ($N = 10$)

Заключение

По методике ЭГАК на эйлеровой счетной сетке и по методике ТИМ на неструктурированной лагранжевой счетной сетке проведено численное моделирование распространения ударной волны и образования полости в песке при взрыве расположенной внутри массива грунта тонкой пластины химического ВВ. Для описания поведения песка в расчетах использовалась упругопластическая релаксационная модель деформирования мягкого грунта. Получено хорошее согласие результатов этих расчетов с экспериментальными данными и между собой.

Литература

1. Справочник взрывника / Под ред. Б. Н. Кутузова. М.: Недра, 1988.
2. Замышляев Б. В., Евтерев Л. С. Модели динамического деформирования и разрушения грунтовых сред. М.: Наука, 1990.
3. Янилкин Ю. В., Беляев С. П., Городничев А. В. и др. Комплекс программ ЭГАК++ для моделирования на адаптивно-встраивающейся дробной счетной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2003. Вып. 1. С. 20–28.
4. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–44.
5. Зубарев В. Н., Евстигнеев А. А. Уравнения состояния продуктов взрыва конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1984. № 6. С. 114–119.
6. Гердюков Н. Н., Иоилев А. Г., Ковтун А. Д. и др. Исследование сжимаемости песчаного грунта при ударно-волновом нагружении // Прикл. механ и техн. физ. 1993. № 4. С. 55–58.