

УДК 544.454.3:004.415.001.5

С. К. Асланов, Н. Н. Драгуновский, А. П. Царенко
Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ НА ОБЪЕКТЫ

Доповідь зроблено на засіданні наукового семінару
кафедри теоретичної механіки ОНУ 06.12.2002 р.

Здійснено постановку чисельного експерименту по дослідженню процесу розльоту газової хмари, що створена продуктами швидкого енерговиділення, в атмосферне середовище, яке перебуває у стані спокою, та взаємодії вибухових хвиль з різними перепонами. Створено відповідну Windows-програму. Результати розрахунків вказують на складну просторово-часову картину ударно-хвильової дії на об'єкти.

Осуществлена постановка численного эксперимента по исследованию процесса разлета газового облака, образованного продуктами быстрого энерговыделения, в покоящуюся атмосферную среду, и взаимодействию взрывных волн с различными препятствиями. Создано соответствующее Windows-приложение. Результаты расчетов показывают сложную пространственно-временную картину ударно-волнового воздействия на объекты.

The numerical experiment statement on the analysis of gas cloud scattering from the rapid energy discharge in rest atmosphere and of the interaction blast waves with various barriers is realized. The calculation results are demonstrated the space-time poly-structure of the shock-wave action in objects.

Введение. Возрастающие объемы перевозок и использования в производстве и быту газообразных и легко испаряющихся горючих систем ставят на одно из первых мест вопросы взрывобезопасности топливно-воздушных смесей. Ошибки персонала, износ оборудования, одновременная реализация случайных событий могут повлечь за собой аварийные ситуации, связанные с быстропротекающими процессами сгорания образующихся (например, при выбросах) горючих облаков. В связи с этим возникает необходимость оценки вероятных последствий таких ситуаций.

Чтобы иметь возможность предсказать вероятность разрушения объекта при аварийном взрыве, необходимо полное представление о пространственно-временном распределении давления и импульсе в ударной волне, которая формируется за счет энерговыделения в облаке. Постановка подобных экспериментов в реальных физических условиях, если это вообще осуществимо, требует значительных финансовых затрат и материальных ресурсов для получения результатов лишь специфического характера, ведь реальная обстановка так или иначе связана со сложной конфигурацией поверхности земли и застроек в условиях производственных и жилых массивов. По этой причине роль теоретического анализа и численного эксперимента может оказаться решающей в исследовании подобных аварийных ситуаций.

Имеющиеся в литературе результаты по оценкам взрывного воздействия на преграды носят в лучшем случае полуквантитативный характер [1]. Построенные же по

различным экспериментам эмпирические формулы для интенсивности ударной волны от взрыва конечного объема газовой смеси ограничены исключительно ее распространением в свободном пространстве и сферической симметрией облака [2,3].

Для этого же случая нами была построена интегральная аналитическая теория взрывных волн [4–7]. Результаты соответствующих численных экспериментов приведены в [8–10].

В настоящей работе реализован численный эксперимент по расчету взрывного воздействия газообразных продуктов энерговыделения в виде облака с заданной геометрией на окружающие физические объекты, имеющие достаточно универсальную форму и взаимное расположение на местности.

Основной расчетный алгоритм предлагаемого численного эксперимента построен по двумерной схеме Годунова [11] на равномерной неподвижной эйлеровой сетке. Метод Годунова является монотонным консервативным первого порядка точности. Его разностная схема базируется на интегральных законах сохранения, применяемых к каждой газовой ячейке на каждом шаге по времени. При этом потоки массы, импульса и энергии через границы ячейки определяются с учетом известных решений задачи о «распаде разрыва» на этих границах. Устойчивость вычислений обеспечивается выполнением условий Куранта [11]. Все перечисленные особенности метода позволяют численно получать гладкие (без осцилляций, присущих конечно-разностным методам) решения для тех задач, в которых присутствуют сильные разрывы газодинамических функций. Именно такой является задача о распространении взрывной волны в пространстве со многими препятствиями.

Очевидно, что реальное газодинамическое течение подобного рода является трехмерным и существенную роль играет разгрузка избыточных давлений в вертикальном направлении. Отметим сразу, что реализация строгой трехмерной постановки потребует значительных компьютерных ресурсов, не доступных пока в рамках имеющихся ПЭВМ. Предлагаемый двумерный подход может служить в качестве асимптотики трехмерного решения задачи вблизи поверхности Земли. Кроме того, использование дискретной модели сплошной среды при аппроксимации основных уравнений газовой динамики влечет за собой «размазывание» ударных волн, что приводит к уменьшению их интенсивности при численном эксперименте и в определенной мере компенсирует отсутствие разгрузки давлений по вертикали. Некоторое завышение данных об интенсивности ударно-волновых воздействий на объекты вполне допустимо при их использовании в экспертных оценках для последствий возможных аварий. Применение же известных эмпирических формул [2,3], полученных по экспериментам в свободном пространстве, принципиально неприемлемо при наличии застройки местности.

Для реализации численного эксперимента разработано Windows-приложение, результатами работы которого являются файлы с данными об изменениях основных газодинамических параметров во времени в задаваемых точках пространства.

1. Математическая постановка задачи. В плоской постановке численно решается задача о разлете газового облака с продуктами энерговыделения (быстрого горения, детонации) в окружающее пространство и процессе взаимодействия образующейся при этом взрывной волны с различными препятствиями (объектами).

Продукты энерговыделения и атмосферный воздух моделируются как идеальный газ, параметры которого подчиняются основным уравнениям нестационарной газовой динамики:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(p + \rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} = 0, & \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(p + \rho v^2)}{\partial y} = 0, & \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial[(e+p)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(e+p)v]}{\partial y} = 0, \end{cases}$$

и уравнению состояния в виде $\varepsilon = \varepsilon(p, \rho) = p/[(\gamma - 1)\rho]$, где ε – внутренняя энергия единицы массы среды, u и v – проекции вектора скорости газа на декартовы оси Oxy , t – время, ρ и p – соответственно плотность и давление газа, $e = \rho(\varepsilon + (u^2 + v^2)/2)$ – полная удельная энергия. Отношение теплоемкостей $\gamma = c_p/c_v$ продуктов энерговыделения и атмосферного воздуха в силу близости их величин предполагается равным некоторому эффективному значению.

Практическая невозможность выделения контактного разрыва в расчетной области, где происходят множественные взаимодействия волновых элементов между собой, свидетельствует в пользу последнего допущения.

Поскольку динамика развития процесса энерговыделения внутри газового объема заранее не известна, то для определения давления p_v продуктов взрыва в облаке по заданному количеству смеси и ее теплотворной удельной способности Q естественно воспользоваться интегрально энергетическим подходом. Примем, что вся выделившаяся химическим путем энергия $E_v = \rho_0 V_0 Q$ в осредненном виде переходит только во внутреннюю энергию продуктов реакции, которые предполагаются идеальным газом с постоянным отношением теплоемкостей γ (таким же по значению, как и у исходной газовой смеси). Тогда из закона сохранения энергии для начального объема V_0 продуктов сгорания

$$\frac{p_0 V_0}{\gamma - 1} + E_v = \frac{p_v V_0}{\gamma - 1},$$

где первое слагаемое представляет собой начальную внутреннюю энергию объема смеси, получаем $p_v = (\gamma - 1)\rho_0 Q + p_0$.

Различные объекты, рассматриваемые в данной задаче, группируются в отдельные подмножества по их геометрическому признаку – форме основания (фундамента) или виду объекта в плане, который, как правило, и наносится на карту застройки.

Указанные объекты можно условно разделить на два типа, имеющих форму прямоугольника или эллипса (овала). Комбинируя эти элементарные фигуры на планкарте, можно моделировать объекты и более сложной формы.

Область пространства, заполненная газообразными продуктами энерговыделения, моделируется в виде эллипса с заданными полуосями a_V и b_V . С центром этого эллипса связывается исходная (начальная) декартова система Oxy пространственной ориентировки. Положение самого эллипса по отношению к координатным осям задается при помощи угла α_V между осью Ox и полуосью a_V , расположенной всегда в первой четверти координатной плоскости. Таким образом, величина угла α_V принадлежит интервалу $0^\circ \leq \alpha_V < 90^\circ$.

Параметры продуктов энерговыделения в начальный момент времени имеют однородное распределение по всему объему и соответственно равны:

$$p = p_V, \quad \rho = \rho_V, \quad u = v = 0.$$

Параметры окружающего атмосферного воздуха в начальный момент времени имеют также однородное распределение:

$$p = p_a = 0,1013 \text{ МПа}, \quad \rho = \rho_a = 1,29 \text{ кг/м}^3, \quad u = v = 0 \text{ м/с}.$$

Область пространства, в которой ставится численный эксперимент, представляет собой прямоугольник, полностью покрывающий все заданные объекты и датчики, со сторонами, параллельными координатным осям Oxy . Это покрытие выполняется с определенным «запасом», для того чтобы реализовать граничные условия «свободного вытекания», т.е. беспрепятственного распространения волн за пределы области решения. Таким способом численно моделируется математическое условие в виде заданных параметров невозмущенного атмосферного воздуха перед распространяющейся взрывной волной.

Положение всех остальных объектов, в том числе и датчиков, фиксируется по отношению к указанной выше системе координат Oxy (см. рис. 1).

Основными задаваемыми параметрами объектов являются:

- координаты «центра» объекта (x_*, y_*) ;
- длины сторон (у прямоугольного объекта) a_r и b_r ;
- длины полуосей (у овального объекта) a_o и b_o ;
- угол $0^\circ \leq \alpha_* < 90^\circ$ наклона стороны a_r (полуоси a_o) к оси координат Ox .

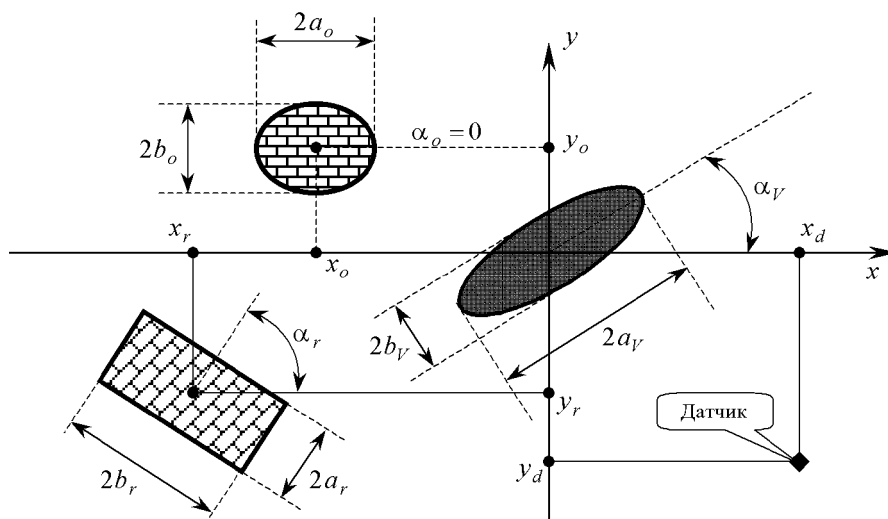


Рис. 1. Образец формирования планкарты застройки

Датчики представляют собой виртуальные устройства (приборы), предназначенные для фиксации основных параметров газодинамического процесса в контрольных точках пространства в течение всего промежутка времени данного численного эксперимента. Присутствие датчиков в расчетной области никоим образом не сказывается на распространении взрывных волн и газодинамическом течении в целом, поэтому их

количество не ограничено. Датчики характеризуются координатами (x_d, y_d) в системе Oxy и размещаются вне объектов.

При проведении численного эксперимента с целью определения динамического воздействия взрывной волны на конкретный объект, датчики располагаются с определенной частотой по всему периметру этого объекта. Данные численного эксперимента, полученные на такой совокупности датчиков, можно в дальнейшем использовать при численном решении задач о деформациях и разрушениях конструкций, из которых построен данный объект [1].

2. Демонстрационный пример. В качестве конкретной реализации разработанной программы решена задача численного моделирования аварийной ситуации – взрыва газа при проведении сварочных работ вблизи жилых домов. Планкарта, для которой производились расчеты, приведена на рисунке 2.

Облако, образованное продуктами энерговыделения, объемом 6 м^3 , имело десятикратное превышение давления над атмосферным. Расчетная область, включая размещенные на ней объекты, имела площадь $100 \times 100 \text{ м}^2$. Контрольный датчик, показания которого обсуждаются далее, помечен на этом рисунке выноской.

Контрольный датчик непосредственно примыкает к той стене объекта, что находится в тени от направления распространения основного фронта взрывной волны. Такое расположение датчика позволяет выявить сложную картину ударно-волнового воздействия на объект с течением времени.

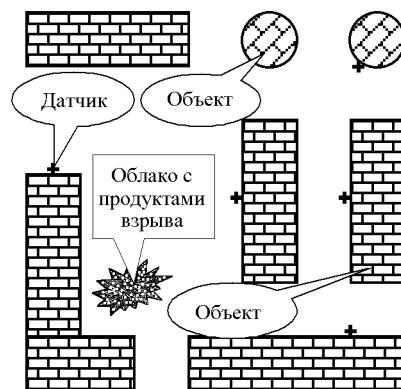
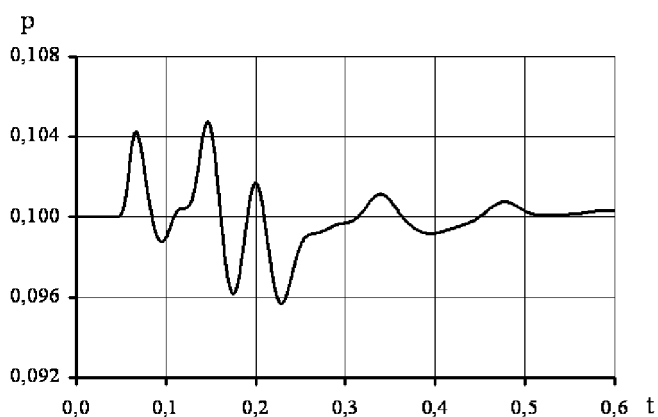
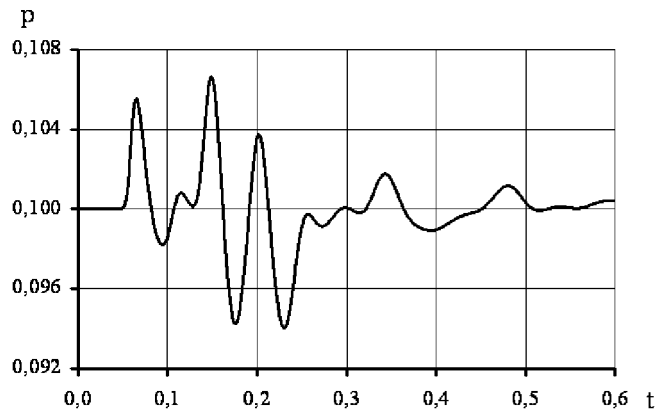


Рис. 2. Планкарта расчета

График зависимости $p(t)$, зафиксированный в этом датчике (рис. 4), где давление исчисляется в МПа, а время – в секундах, демонстрирует чередование высокоамплитудных фаз сжатия и разрежения на коротком промежутке времени. Такой колебательный эффект воздействия на стену объекта наиболее опасен с точки зрения ее разрушения. Причиной же такого поведения давления в датчике является неоднократное взаимодействие взрывной волны с объектами, в результате чего формируется многофронтная волновая структура, в которой происходят взаимные усиления фаз сжатия и разрежения. При этом вклад головного фронта взрывной волны в общую картину ударного воздействия на стену объекта, как показывают графики, не является определяющим. Таким образом, полученные результаты численного эксперимента конкретно подтверждают высказанное выше соображение о принципиальной непригодности выводов об интенсивности воздействия взрывных волн на объекты, сделанных с позиций случая распространения ударной волны в свободном пространстве.

Математическая достоверность получаемых результатов проверялась увеличением числа расчетных ячеек на 1 м^2 расчетной области. На рис. 3 и рис. 4 представлены в виде графиков $p(t)$ показания контрольного датчика, полученные соответственно при 4 и 9 ячейках на 1 м^2 .

Прежде всего, следует отметить, что уменьшение размеров ячейки оставляет неизменным положение максимумов и минимумов распределения давления $p(t)$. Некоторое увеличение самих амплитуд давления сопровождается уменьшением продолжительности во времени соответствующих фаз сжатия и разрежения, либо проявлением колебаний со значительно меньшими амплитудами. Импульсы фаз при этом изменяются незначительно.

Рис. 3. Расчет при 4 ячейках на 1 м^2 Рис. 4. Расчет при 9 ячейках на 1 м^2

Очевидно, что большее число ячеек на 1 м^2 расчетной области позволит как учесть особенности геометрической формы объектов, так и адекватнее отразить истинную картину ударно-волнового процесса и зафиксировать более мелкие ее детали.

С другой стороны, излишнюю детализацию следует признать нецелесообразной по той причине, что уточнение данного асимптотического подхода обязательно повлечет за собой усиление эффекта вертикальной разгрузки давления. Помимо этого, повышение детализации влечет многократное увеличение времени, которое затрачивается компьютером для проведения единичного расчета. Приведенные выше результаты потребовали соответственно: для 4 ячеек на 1 м^2 – 16 минут, а для 9 ячеек на 1 м^2 – 62 минуты работы компьютера на базе Pentium-III 900 МГц.

Реализация расчетов для более сложных областей и более мощных взрывов потребует организации параллельных вычислений в рамках ЭВМ с кластерной архитектурой и с соответствующей операционной системой.

Заключение. Разработанный нами программный комплекс «FLASH» является полноценным Windows-приложением, предназначенным для проведения предварительных численных экспериментов для рассматриваемого класса плоских нестационарных течений идеального газа. Анализ данных, полученных при помощи программы «FLASH» на стандартном компьютере, поможет исследователю определиться с вопросом о необходимости привлечения более мощной вычислительной техники для проведения детальных численных экспериментов для тех участков планкарты, где уже зафиксированы наиболее опасные воздействия на объекты.

Приложение «FLASH», созданное на основе компонент, разработанных в разных языковых средах, оказалось удачным примером одновременного использования достоинств математического языка программирования Fortran [12] и объектно-ориентированной среды разработки Windows-приложений Delphi-5 [13].

1. Бейкер У., Кокс П. Взрывные явления. Оценка и последствия. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
2. Когарко С. М., Адушкин В. В., Лямин А. Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Научно-технические проблемы горения и взрыва (ФГВ). – 1965. – № 2. – С. 22–34.
3. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Цыганов С. А. О моделировании волн давления, образующихся при детонации и горении газовых смесей // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21, № 2. – С. 54–61.
4. Асланов С. К., Голинский О. С. Энергия асимптотически эквивалентного точечного взрыва для взрыва заряда конечного объема в совершенном газе // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1988. – № 6. – С. 44–51.
5. Асланов С. К., Голинский О. С. Интегральная теория взрывных волн. – К., 1993. – 30 с. (Препр. / НАН України. Ін-т геофізики).
6. Асланов С. К., Шкулипа С. А., Царенко А. П. К теории взрывных волн от горючих облаков // Физика аэродисперсных систем. – 1998. – Вып. 37. – С. 124–125.
7. Асланов С. К. Об асимптотике взрывных волн // Доповіди НАН України. – 2003. – № 4. – С. 40–44.
8. Асланов С. К., Голинский О. С., Ивлев С. А. К теории разлета газового шара // Физика удара и волновая динамика в Космосе и на Земле. – М.: ВАГО, 1983. – С. 101–108.
9. Ждан С. А. Расчет взрыва газового сферического заряда в воздухе // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1976. – № 6. – С. 56–62.
10. Ашратов Э. А., Пирумов У. Г., Сурков В. В. Распространение ударной волны в воздухе при взрыве газового заряда // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1986. – № 3. – С. 17–21.
11. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. Численное решение многомерных задач газовой динамики. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
12. Бартедьев О. В. Современный Фортран. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 448 с.
13. Архангельский А. Я. Программирование в Delphi 5. – М.: БИНОМ, 2000. – 1000 с.

Получено 23.12.2002 г.