

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ НАГРУЗКИ ОТ ВЗРЫВА НА ОТДЕЛЬНО СТОЯЩУЮ ПРИЗМУ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ И КОМПЛЕКС ПРИЗМ, ИМИТИРУЮЩИХ ГОРОДСКУЮ ЗАСТРОЙКУ

С.А. Вальгер<sup>1</sup>, А.В. Федоров<sup>1,2</sup>, Н.Н. Федорова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
630090, г. Новосибирск, Россия

Возникновение чрезвычайных ситуаций на взрыво- и пожароопасных производствах, а так же рост общественной опасности террористических актов, совершенных посредством взрывов обуславливают необходимость разработки защитных мероприятий для обеспечения взрывобезопасности и взрывоустойчивости зданий и сооружений. Используемые при проектировании зданий СНиП [1] и упрощенные инженерные формулы [2] позволяют учесть ударно-волновую нагрузку только в том случае, если исследуемый объект находится в прямой видимости от эпицентра взрыва. В связи с этим актуальным представляется создание вычислительных технологий, позволяющих предсказать динамическую ударно-волновую нагрузку на отдельно стоящие здания и их комплексы с учетом многократного отражения ударных волн, их интерференции и дифракции на поверхностях исследуемых объектов.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования ударно-волновых воздействий на простые конфигурации, для которых имеются экспериментальные данные из литературы. Расчеты проведены с использованием ANSYS AUTODYN.

На первом этапе рассмотрим задачу о воздействии воздушного взрыва заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) на призму прямоугольного сечения, установленную на поверхности земли на некотором расстоянии от эпицентра взрыва (Задача 1). Моделирование проведено в условиях экспериментальных данных [3]. В эксперименте выполнены измерения давления в точках Т1 и Т2, расположенных на наветренной и подветренной сторонах призмы. На рис. 1 представлена схема расчетной области в разрезе (а), плане (б) и в изометрическом виде (в).

Расчетная область представляет собой объем воздуха с начальными параметрами, соответствующими нормальным атмосферным условиям: плотностью  $\rho_B = 1,225 \text{ кг/м}^3$ , температурой  $T = 298,15 \text{ К}$ , статическим давлением  $P = 101325 \text{ Па}$ , теплоемкостью  $C_p = 1004 \text{ Дж/К/кг}$ . Размеры призмы составляют  $0,061 \text{ м} \times 0,183 \text{ м} \times 0,183 \text{ м}$ . Взрыв ВВ Detex массой  $23,7 \text{ г}$  (тротиловый эквивалент  $m = 27,26 \text{ г}$ ) происходит на расстоянии  $L = 1,5 \text{ м}$  от фронтальной поверхности призмы на высоте  $H_{ВВ} = 0,1 \text{ м}$  над поверхностью земли. Подложка и закрепленная на ней призма в расчете предполагаются абсолютно жесткими. На их границах заданы условия непротекания, т.е равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости. На внешних границах расчетной области применены "мягкие" граничные условия, обеспечивающие выход возмущений за границы области. С целью сокращения расчетных ресурсов задача решена в симметричной относительно плоскости  $XZ$  постановке.

Движение воздушной среды описывается системой уравнений Эйлера, дополненной уравнением состояния идеального газа. Течение расширяющихся продуктов детонации ВВ описывается с помощью гидродинамической модели материала с использованием уравнения состояния Джона-Вилкинса-Ли [4].

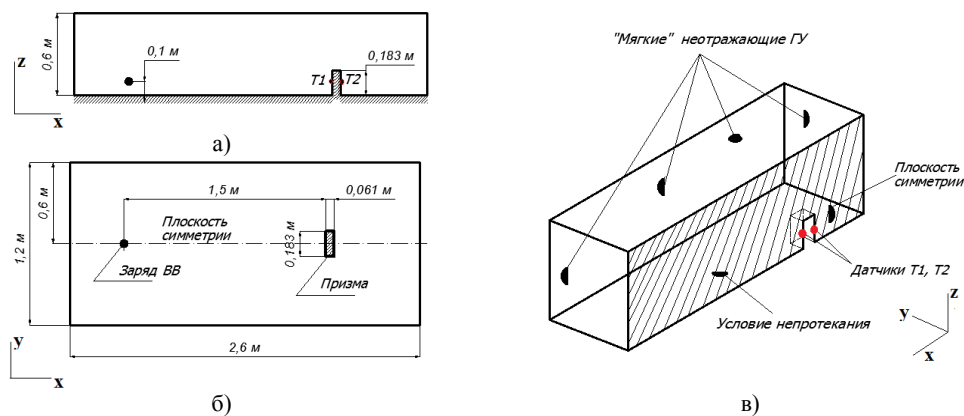


Рисунок 1. Схема расчетной области в разрезе (а), плане (б) и изометрии (в)

Решение уравнений Эйлера выполнено с помощью метода конечных разностей. Для аппроксимации уравнений в работе использованы метод Годунова второго порядка точности по пространству [5] и метод коррекции потоков (FCT) [6]. Интегрирование уравнений по времени осуществлялось с помощью явной схемы второго порядка точности с соблюдением условия устойчивости схемы по числу Куранта.

Пространственная дискретизация 3D расчетной области представляет собой структурированную расчетную сетку гексаэлементов. Для исследования сеточной сходимости решения выполнена серия расчетов на сетках с последовательным измельчением размера элемента в различных направлениях от 0,01 м до 0,005 м. Наиболее подробная расчетная сетка имела характерный масштаб ячейки  $d=0.005$  м во всех направлениях и включала около 7,5 млн узлов. На двух последних сетках получено совпадение результатов с точностью 3.7%.

Расчетные данные достаточно точно воспроизводят структуру ударно-волнового течения, включающей отражение взрывной ударной волны (УВ) от поверхности подложки, формирование тройной конфигурации УВ, «схлопывание» отраженных УВ в эпицентре взрыва, формирование вторичных фронтов и другие наблюдаемые в эксперименте детали течения [7]. На рис. 2 приведены полученные в расчетах поля статического давления в плоскости симметрии в момент  $t = 0.62$  (рис. 2, а), соответствующем времени «схлопывания» отраженной от поверхности земли УВ, и  $t = 2.45$  мсек (рис. 2, б), соответствующем времени прихода УВ на фронтальную часть призмы. За фронтом основной УВ вблизи наветренной поверхности призмы с избыточным давлением  $\Delta P \approx 0,8$  КПа следует зона разрежения  $\Delta P \approx -0,1$  КПа и вторичный фронт  $\Delta P \approx 0,1$  КПа.

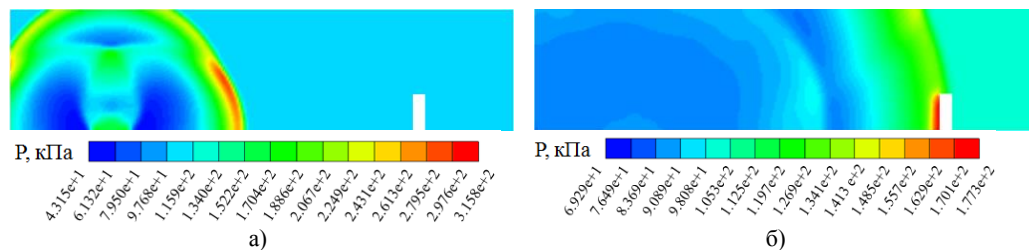


Рис. 2. Мгновенные поля статического давления в моменты времени  $t=0.62$  (а) и  $t=2.45$  мсек (б)

Характер воздействия УВ на стенки призмы можно оценить по зависимости статического давления  $P(t)$  и эффективного импульса  $I(t) = \int_0^t (P(\tau) - P_0) d\tau$ , где  $P_0 = 1$  атм. Наличие экспериментальных данных позволяет сопоставить данные расчетов и физического эксперимента по времени прихода взрывной УВ, пиковому давлению УВ в точках измерения на стенках призмы, амплитудам отрицательной фазы и вторичных пиков. На рис. 3 показаны зависимости статического давления и эффективного импульса от времени в точке Т1, полученные в расчетах по схеме Годунова (1) и FCT (2) на сетке с размером ячейки 0,01 м. Сравнение показывает, что обе схемы дают небольшую задержку в предсказании времени прихода основного и вторичного пиков давления, однако схема FCT более точно предсказывает амплитуду основного пика давления и лучше разрешает вторичные пики.

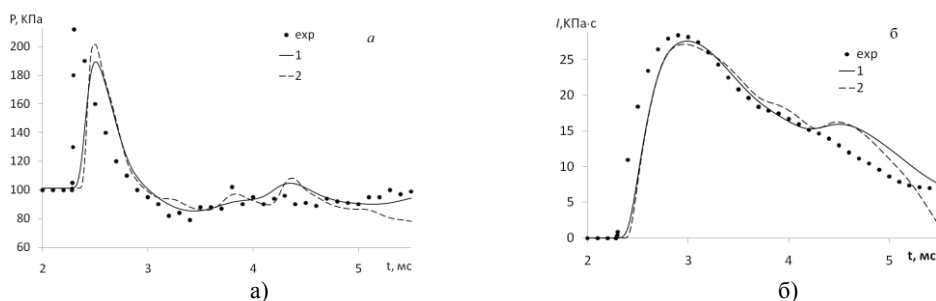


Рис. 3. Статическое давление (а) и эффективный импульс (б) в точке Т1, полученные в эксперименте (символы); и расчете (линии) по схеме Годунова (1) и метода FCT (2)

Далее решена Задача 2, в которой проведено моделирование ударно-волнового воздействия на комплекс призм различной высоты. Схема комплекса в плане представлена на рис. 4, а. В начальный момент времени  $t = 0$  мсек в точке С1 происходит взрыв заряда ВВ  $m=0.016$  кг в тротиловом эквиваленте. Моделирование проводилось в условиях экспериментальных данных [8] в полной 3D постановке с использованием описанных выше численных методов. На рис. 4,б показана изоповерхность давления  $P=20\%$  от  $P_{max}$  на момент времени  $t = 0,24$  мсек, показывающая сложную пространственную форму фронта взрывной УВ.

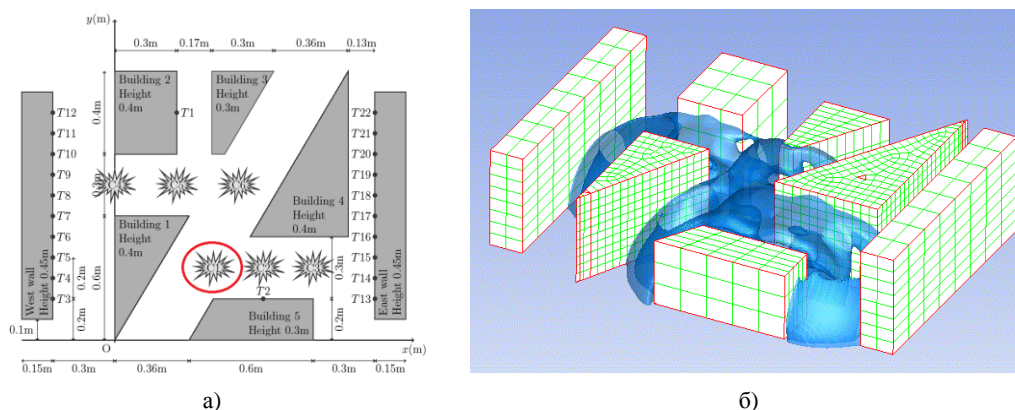


Рис. 4. Схема Задачи 2 в плане (а) и расчетная изоповерхность статического давления  $P=20\%$  от  $P_{max}$  в момент времени  $t = 0,24$  мсек (б)

На рис. 5 представлены зависимости статического давления  $P(t)$  в точках T1 и T21, полученные по результатам эксперимента [8], а также в расчетах по различным схемам. Рисунок показывает, что метод FCT позволяет более точно предсказать основной пик давления, а также разрешает вторичные пики давления, связанные с отражением и интерференцией УВ.

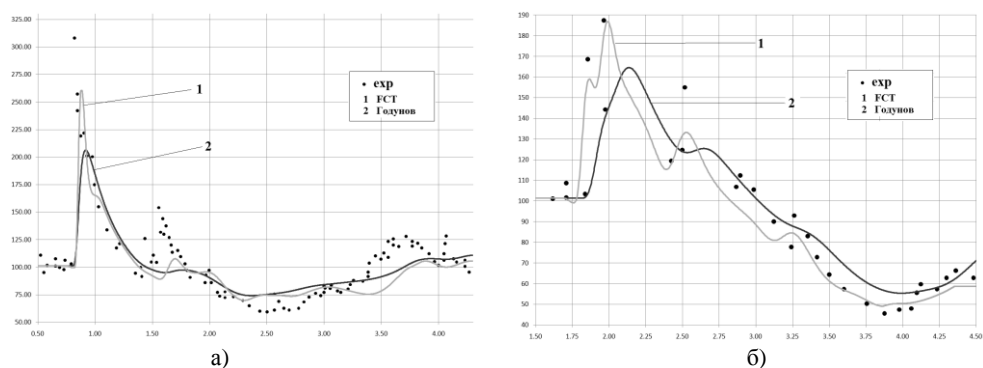


Рис. 5. Экспериментальные данные [8] (точки) и полученное по различным схемам расчетные распределения (линии) статического давления в точках T1 (а) и T21 (б)

Таким образом, результаты проведенных расчетов показывают, что использование метода FCT позволяет более точно предсказать пиковое давление и эффективный импульс по сравнению со схемой Годунова и с большей точностью разрешить вторичные максимумы давления. Дальнейшая работа связана с детальным анализом волновых картин течения, реализующихся при взрыве ВВ в положениях С1 - С6 (см. рис. 4,а), а также уточнением расчетных данных на более подробной расчетной сетке.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №15-07-06581-а) и Минобрнауки РФ (проект № 211, ЗАДАНИЕ № 2014/140 на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Строительные нормы и правила.** СНиП 2.01.07-85\*. Нагрузки и воздействия. – М.: ФГУП ЦПП, 2010. – 72 с.
2. **Hyde D.,** “User’s Guide for Microcomputer Programs CONWEP and FUNPRO – Applications of TM 5-855-1”, U.S. Army Engineer Waterways Experimental Station, Vicksburg, 1988.
3. **Rose T. A.** An Approach to the Evaluation of Blast Loads on Finite and Semi-Infinite Structures. PhD thesis, Engineering Systems Department, Cranfield University, Royal Military College of Science, February 2001.
4. **Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкевич К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И.** Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
5. **Van Leer B. J.** Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's Method // J. Comput. Phys. 1979. V. 32, No. 1. P. 10 – 136.
6. **Zalesak S.T.** Fully Multidimensional Flux-Corrected Transport Algorithms for Fluids // J. Comput. Phys. 1979. V. 31. P. 335 – 362.
7. **Вальгер С.А., Данилов М.Н., Федорова Н.Н., Федоров А.В.** Сравнение данных моделирования ударно-волнового воздействия на сооружения с использованием ПК ANSYS AUTODYN и LS-DYNA. //Известия Высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин). 2014, №9. С. 85 - 96.
8. **Matthew A. Brittle.** Blast propagation in a geometrically complex environment. MSc dissertation, Cranfield University, Defense College of Management and Technology, Defense Academy of the UK, Shrivenham, Swindon, SN6 8LA, UK, Jul. 2004.