

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПЛОХООБТЕКАЕМОГО ТЕЛА, ЗАКРЕПЛЕННОГО НА ПЛОСКОЙ ПОДЛОЖКЕ

С.А. Вальгер^{1,2}, Н.Н. Федорова^{1,2}, А.В. Федоров^{1,2}

¹ *Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, 630090 г. Новосибирск, Россия*
² *Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин), 630008, г. Новосибирск, Россия*

Рост опасности террористических угроз, совершаемых посредством взрыва взрывчатых устройств в городской застройке и местах скопления людей, сегодня ставит перед градостроительной отраслью новые и ответственные задачи. Технологии планирования городских территорий, возведения новых зданий, проектирования новых материалов и типов конструкций должны отвечать высоким требованиям по защите от разрушительных последствий взрывов. Распространение в городской застройке ударных волн, формирующихся при взрыве конденсированного взрывчатого вещества, приводит к нарушению целостности ограждающих конструкций зданий, а также разлету мелких поражающих элементов (стекло, строительный мусор и т.д.), которые представляют угрозу для пешеходов. Кроме того, плотная городская застройка способствует интенсификации взрывных последствий за счет возникновения и усиления интерференционных эффектов в ударно-волновом течении при обтекании сложных систем препятствий. Для уменьшения разрушительных последствий взрывов требуется разработка современных методик прогнозирования ударно-волновой структуры течения и параметров ударных волн с учетом расположения зданий и сооружений на местности.

Существующие сегодня полуэмпирические методики [1, 2] позволяют с достаточной точностью предсказать динамическую нагрузку от взрыва на ограждающие конструкции в зависимости от мощности взрыва и расстояния до эпицентра взрыва. Однако они не могут быть применены для случаев сложной застройки, т.к. не позволяют предсказать эффекты «затенения» объектами при распространении ударной волны, что было показано в работе [3]. В связи с этим все более актуальным представляется создание вычислительных технологий и методик, позволяющих численно предсказать динамическую ударно-волновую нагрузку на отдельно стоящие здания и их комплексы с учетом многократного отражения ударных волн. В работе [4] авторами были получены результаты численного моделирования ударно-волнового течения в окрестности отдельно стоящих плохообтекаемых тел и их комплексов с применением программного продукта явной динамики ANSYS AUTODYN. Результаты моделирования показали удовлетворительное соответствие с экспериментальными данными [5] по величине первого пика ударно-волновой нагрузки, приходящей на стенки обтекаемых объектов. Однако в [4] не удалось с удовлетворительной точностью предсказать менее интенсивные пики нагрузки, связанные с приходом на стенки тел вторичных ударных волн в результате многократных отражений и интерференционных эффектов. Вследствие этого было сделано предположение о необходимости локального уточнения решения, описывающего распространение ударной волны, на основе адаптивных методов перестроения сетки, а также учета реальных свойств воздуха.

В настоящей работе рассматриваются аспекты численного моделирования ударно-волновых течений, инициированных взрывами конденсированных взрывчатых веществ, в

окрестности плохообтекаемых тел с применением программного комплекса Fluent², имеющего расширенный функционал для динамической адаптации расчетной сетки и подключения пользовательских уравнений состояния.

Комплекс Fluent предназначен для моделирования течений жидкостей и газов, поэтому для адаптации модуля к решению задачи о взрыве конденсированного взрывчатого вещества в работе использован метод [6], позволяющий представить взрыв конденсированного взрывчатого вещества на некотором начальном этапе времени в виде сферы сжатого газа с уточненными исходными параметрами. Движение воздушной среды описывается системой уравнений Эйлера для невязкой среды. Для воздуха рассмотрено уравнение идеального и реального газа [7].

В качестве модельной задачи рассмотрена задача об ударно-волновом течении в окрестности одиночной призмы, стоящей на плоской подложке [5]. Численное моделирование выполнено с использованием явной схемы интегрирования по времени и вторым порядком аппроксимации по пространству. Шаг интегрирования по времени рассчитывался автоматически таким образом, чтобы число Куранта не превышало значения 0.7, шаг по времени варьировался в диапазоне $\tau \sim 10^{-8} \div 10^{-7}$ сек. В работе были выполнены расчеты на равномерной расчетной сетке и с учетом локальной динамической адаптации сетки по градиенту плотности [8].

По результатам расчета описана ударно-волновая структура течения в окрестности призмы, а также проведено сравнение с экспериментальными данными [5] по графикам зависимости статического давления и импульса от времени. Показано, что использование локальной динамической адаптации сетки позволяет существенно сократить расчетное время решения.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ №16-19-00010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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
2. **Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкевич К.П., Чельшев В.П., Шехтер Б.И.** Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
3. **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 // Изв. вузов. Строительство. – Новосибирск, 2014. – № 9. – С. 85–96
4. **Вальгер С. А., Федорова Н. Н., Федоров А. В.** Математическое моделирование распространения взрывных волн и их воздействия на объекты // Физика горения и взрыва. – Новосибирск, 2017. – Т.53., № 4. – С. 72–83
5. **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.
6. **Brode N. L.** Numerical Solution of spherical blast waves // J. of Applied. Phys. 1955. V. 26 (6). P.766-775
7. **Soave G.** Equilibrium Constants from a modified Redlich-Kwong equation of State //Chemical Engineering Science. 1972. V 27. 1197.
8. **Daunhofer J. F., Baron J. R.** Grid Adaption for the 2D Euler Equations //Technical Report AIAA-85-0484. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1985.

² Исследование проведено с использованием ПО ANSYS (Customer number 531496)