

## Расчет и проектирование строительных конструкций

УДК 533.6.011.72  
DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

### Численное моделирование фронта воздушной ударной волны при взрыве в воздухе и над землей в программном комплексе LS-DYNA

О.В. Мкртычев, А.Ю. Савенков\*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Российская Федерация, 129337, Москва, Ярославское шоссе, 26

\*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 27 августа 2018 г.; доработана: 09 ноября 2018; принята к публикации: 12 ноября 2018 г.)

**Введение и цели.** При расчете зданий и сооружений на особые сочетания нагрузок, вызванные действием воздушных ударных волн, необходимо определить основные параметры действующей нагрузки. Нормативный подход, реализованный в современных нормативных документах, предлагает использование упрощенных методов расчета, основанных на использовании эквивалентных статических нагрузок. Целью исследования является получение основных параметров воздушных ударных волн, используя численное моделирование, а также рассмотрение характера распространения фронта ударной волны при расположении эпицентра взрыва на уровне земли и в воздухе.

**Материалы и методы.** Для получения основных параметров воздушных ударных волн рассматриваются численные методы высокой точности, реализованные в современном программном комплексе LS-DYNA. Для описания процесса взрыва используется лагранжево-эйлеровый подход.

**Результаты.** Получены изополя и графики превышения избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  над атмосферным в распространяющейся воздушной ударной волне при эпицентре взрыва, расположенном на уровне земли и в воздухе, а также на дальнем расстоянии от проектируемого сооружения.

**Выводы.** Рассматриваемый метод численного моделирования позволяет получить основные параметры воздушных ударных волн, которые могут быть использованы для дальнейшего расчета строительных конструкций.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции, взрывные воздействия, воздушная ударная волна, нелинейная динамика, явная динамика, метод конечных элементов, численные методы

#### Введение

При проектировании определенных зданий и сооружений, таких как космодромы, химзаводы, хранилища и системы транспортировки газа и пр., в соответствии с отечественными нормами<sup>1</sup> необходимо выполнять расчет на особые воздействия техногенного или природного характера. Одним из таких воздействий являются воздушные ударные волны (ВУВ).

<sup>1</sup> Федеральный закон № 68 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 11.11.1994 г.

СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77\*. М.: Минстрой России, 2014. 118 с.

ПиНАЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. 22 с.

Источником возникновения ВУВ является высокое давление в центре взрыва. ВУВ представляет собой область резкого сжатия воздуха, распространяющуюся во все стороны со сверхзвуковой скоростью [1]. На рис. 1 приведен закон изменения давления в некоторой точке пространства при прохождении через нее ВУВ. В этой точке мгновенно скачком повышается давление на величину избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  до значения  $P_{\phi}$ . В дальнейшем, по мере продвижения ударной волны, давление падает ниже атмосферного. За зоной сжатия образуется зона разряжения.

Для выполнения расчета конструкций должны быть известны следующие параметры:

- значение избыточного давления на фронте ударной волны  $\Delta P_{\phi}$ , Па;
- время действия фазы сжатия  $\tau_{+}$ , с;

- скоростной напор  $D$ , м/с;
- удельный импульс количества движения за фронтом ударной волны  $i$ , Па·с.

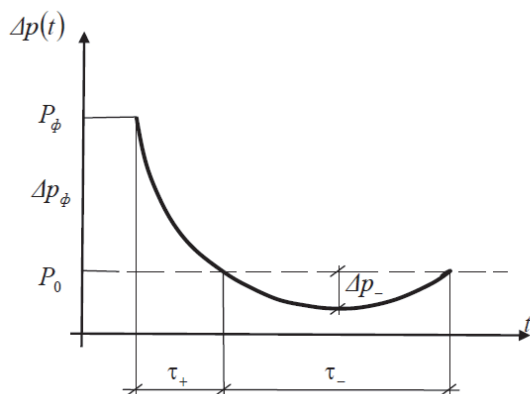


Рис. 1. Закон изменения давления в некоторой точке пространства

[Figure 1. The law of pressure change at some point in space]

При этом избыточное давление во фронте и скоростной напор являются основными характеристиками и определяют поражающее действие УВ на конструкции, а значение давления разрежения не является определяющим из-за малой величины, и им можно пренебречь.

Давление  $\Delta P_\phi$  для свободно распространяющейся сферической воздушной ударной волны убывает по мере удаления от места взрыва. Поэтому расчет его значений обычно проводится на основании соотношений, в которых давление является функцией двух аргументов – массы взрывчатого вещества (ВВ) и расстояния от места взрыва. Сложность разработки и дальнейшего использования таких аналитических выражений определяется следующим обстоятельством. Скорость спада значения  $\Delta P_\phi$  по мере удаления от места взрыва изменяется за счет влияния на ударную волну среды, в которой она распространяется. Чем больше расстояние от места взрыва, тем сильнее искажается характер изменения давления во фронте ударной волны. Для двух ударных волн, имеющих при одинаковых условиях распространения в некоторый момент времени одно и то же значение  $\Delta P_\phi$ , в последующие моменты значения  $\Delta P_\phi$  будут отличаться, если предыстория распространения этих волн была разной. Следовательно, расчетные соотношения для определения значений  $\Delta P_\phi$  в последующие моменты также должны быть разными.

По этим причинам в технической литературе [2; 3] представлен достаточно широкий спектр расчетных соотношений для определения зна-

чений  $\Delta P_\phi$ , каждое из которых имеет свою сферу применения и назначение. Например, для воздушного взрыва, наземного взрыва, малых расстояний от места взрыва, значительных расстояний от места взрыва, относительно небольших зарядов ВВ, крупных зарядов ВВ и т.д. Характер действия ударной волны зависит от рельефа местности, метеорологических условий, направления ветра, а также во многом от вида взрыва (наземный, воздушный, подземный, подводный).

**Цель исследования** – рассмотреть характер распространения фронта ВУВ при наземном и воздушном взрывах, используя численное моделирование, и получить основные параметры ВУВ для дальнейшего прочностного анализа строительных конструкций.

## Материалы и методы

Взрывное воздействие является высоконелинейным процессом, поэтому целесообразно производить расчет численными методами с помощью современных программных комплексов, основанных на методе конечных элементов. Одним из таких комплексов является программный комплекс LS-DYNA, в котором реализован нелинейный динамический метод, позволяющий выполнять решение задачи во временной области с применением явных схем прямого интегрирования уравнений движения.

Для описания процесса взрыва в программном комплексе LS-DYNA будем использовать эйлеровый подход, который построен на принципе исследования поведения сред, движущихся через неподвижную расчетную сетку, когда все параметры среды рассматриваются как функции координат и времени, что дает наилучший результат при изучении поведения жидкостей или газов. В расчетах применяются произвольные лагранжево-эйлеровые сетки (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [4], при этом могут использоваться процедуры автоматической перестройки и сглаживания конечно-элементной сетки при вырождении элементов. Решение уравнений Эйлера выполнено с помощью метода конечных разностей [5]. Для аппроксимации уравнений в работе использован метод Годунова второго порядка точности по пространству [6]. Интегрирование уравнений по времени осуществлялось с помощью явной схемы второго порядка точности (метод центральных разностей) с соблюдением условия устойчивости схемы по критерию Куранта.

Решение газодинамической задачи в эйлеровой формулировке основывается на трех составляющих:

1) уравнение сохранения массы

$$\dot{\rho} + \rho \times \text{div}(v) = 0, \quad (1)$$

где  $\dot{\rho}$  – производная плотности по времени,  $v$  – вектор скорости;

2) уравнение сохранения количества движения

$$\dot{v} = f - \frac{1}{\rho} \text{grad}(\rho); \quad (2)$$

3) уравнение сохранения энергии

$$\dot{E} + v \times \text{grad}(E) - \frac{p}{\rho^2} (\dot{\rho} + v \times \text{grad}(\rho)) = 0. \quad (3)$$

Уравнения 1–3 в ортогональной системе принимают следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + w \frac{d\rho}{dz} + \rho \left( \frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) \\ \frac{du}{dt} + u \frac{du}{dx} + v \frac{du}{dy} + w \frac{du}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx} = 0 \\ \frac{dv}{dt} + u \frac{dv}{dx} + v \frac{dv}{dy} + w \frac{dv}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dy} = 0 \\ \frac{dw}{dt} + u \frac{dw}{dx} + v \frac{dw}{dy} + w \frac{dw}{dz} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} = 0 \\ \frac{dE}{dt} + u \frac{dE}{dx} + v \frac{dE}{dy} + w \frac{dE}{dz} - \frac{p}{\rho^2} \left( \frac{d\rho}{dt} + u \frac{d\rho}{dx} + v \frac{d\rho}{dy} + w \frac{d\rho}{dz} \right) = 0 \\ p = p(\rho, E) \end{array} \right., \quad (4)$$

где  $p = p(\rho, E)$  – уравнение состояния материала.

Поведение продуктов детонации тротила описывается уравнением состояния Джонса – Вилкинса – Ли (JWL) [1]

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V}, \quad (5)$$

где  $V = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{v}{v_0}$  – относительный удельный объем;  $A, B, C, R_1, R_2, \omega$  – эмпирические константы;  $E_0$  – внутренняя энергия на единицу объема;  $A, B$  и  $E_0$  – имеют единицы давления;  $R_1, R_2, \omega$  и  $v_0$  – безразмерные.

Воздушное пространство описывается полиномиальным уравнением состояния для воздушной среды

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_6 \mu + C_7 \mu^2) E, \quad (6)$$

$$\mu = \frac{1}{V} - 1, \quad (7)$$

где  $V$  – относительный объем,  $E$  – внутренняя энергия.

**Расчетная модель.** Рассмотрим основные параметры фронта ВУВ при наземном (взрыв на поверхности земли) и воздушном взрывах (при  $H < 3,5\sqrt{C}$ , где  $C$  – масса ВВ, кг) на уровне 5 м от поверхности земли. В качестве источника ВУВ примем взрывчатое вещество тринитротолуол, которое

моделировалось в виде куба с размерами сторон 0,2 м. Значение плотности заряда принято равным  $1620 \text{ кг/м}^3$ . Масса взрывчатого вещества составляет 13 кг. Воздушное пространство принято размерами  $10 \times 15 \times 20 \text{ м}(h)$ .

Введем допущение, что поверхность земли является абсолютно жесткой преградой для расширяющихся продуктов детонации заряда ВВ, и ее наличие в математической постановке учитывается соответствующими граничными условиями.

## Результаты

**Наземный взрыв.** На рис. 2, 3 рассмотрен взрыв ВВ на поверхности земли. При таком положении заряда фронт ударной волны представляет собой непрерывно увеличивающееся полушарие, распространяющееся параллельно поверхности земли. По мере удаления от центра скорость ударной волны постепенно уменьшается и ее давление также уменьшается. Давление по фронту ударной волны распределяется неравномерно.

**Воздушный взрыв.** При воздушном взрыве (рис. 4, а–г, 5) ударная волна имеет более сложную картину, чем при наземном взрыве. При воздушном взрыве образуется сферическая ударная волна, которая в ближней зоне, т.е. на расстоянии, меньшем высоты взрыва ( $R < H$ ), падает вниз и называется падающей (рис. 4, в). Дойдя до поверхности земли, ударная волна отражается, образуя

отраженную волну. Вследствие торможения частиц воздуха и сложения падающей и отраженной волн избыточное давление удваивается, образуя головную ударную волну (рис. 4,  $\varepsilon$ ). Ближняя зона называется зоной регулярного отражения. Область, где наблюдается образование и распространение

головной ударной волны, называется дальней зоной, или зоной нерегулярного отражения.

Таким образом, поражающее действие ударной волны воздушного взрыва в ближней зоне определяется давлением отраженной волны, а в дальней зоне – давлением головной ударной волны.

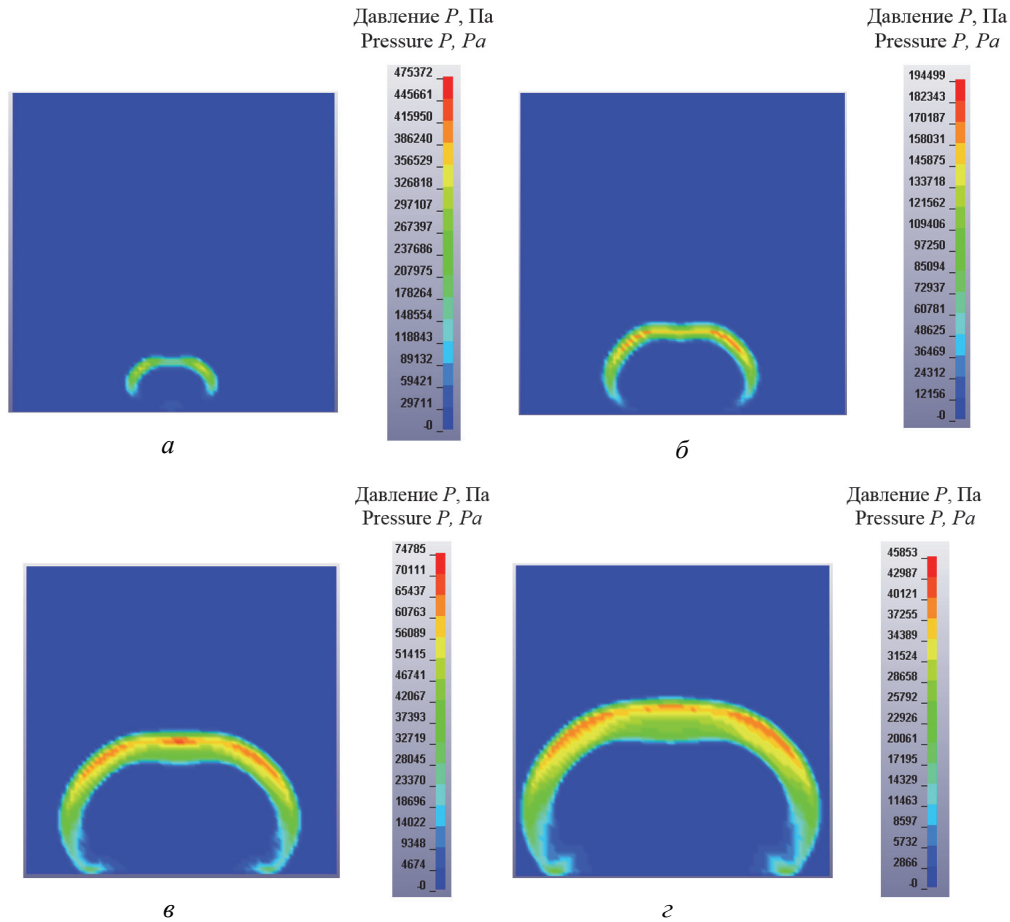


Рис. 2. Изополя давлений в моменты времени:  $a - 0,01$  с;  $б - 0,018$  с;  $в - 0,034$  с;  $г - 0,049$  с  
[Figure 2. Isopoles of pressures at time points:  $a - 0,01$  s;  $б - 0,018$  s;  $в - 0,034$  s;  $г - 0,049$  s]

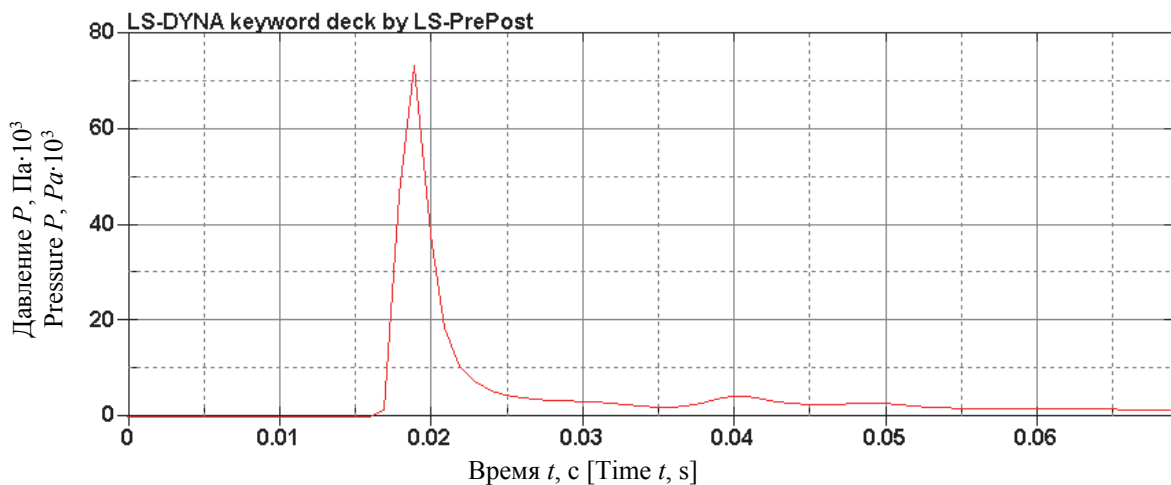


Рис. 3. График приращения давления  $\Delta P_{\Phi}$  во времени на расстоянии 8 м от центра взрыва  
[Figure 3. Graph of pressure increment  $\Delta P_{\Phi}$  in time at a distance of 8 m from the center of the explosion]

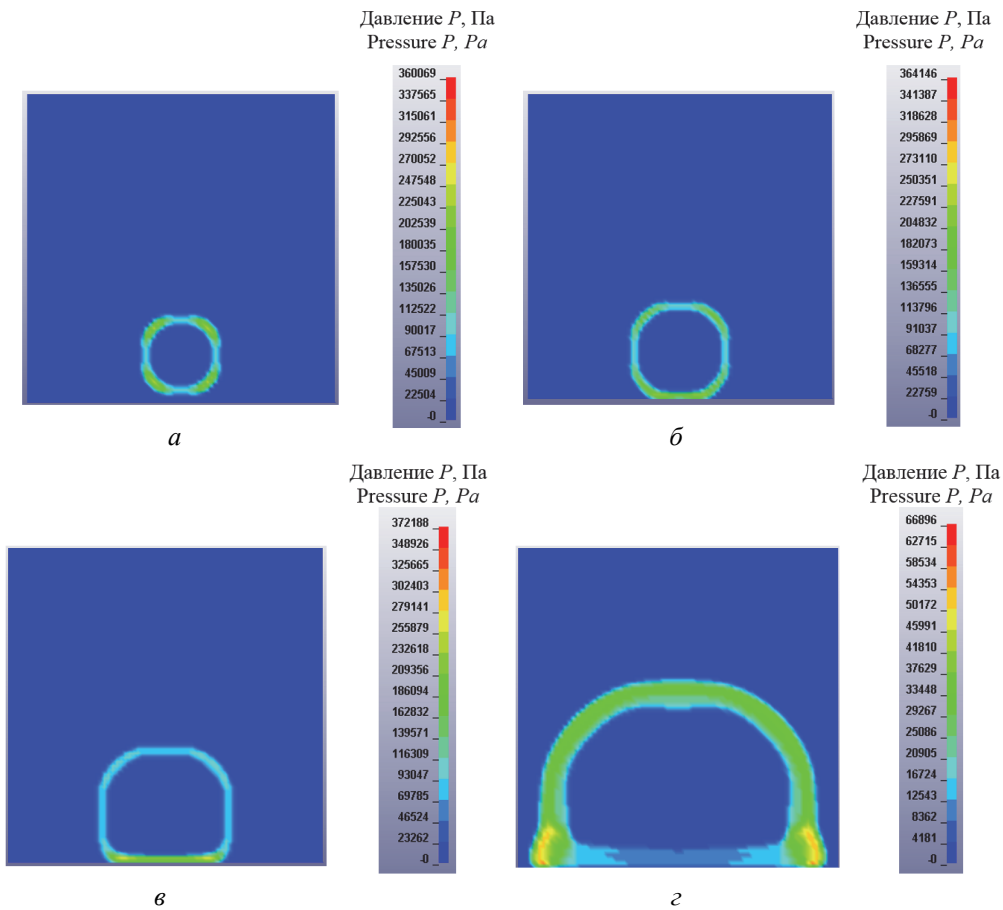


Рис. 4. Изополя давления в моменты времени:  $a - 0,012$  с;  $б - 0,013$  с;  $в - 0,016$  с;  $г - 0,03$  с  
 [Figure 4. Isopoles of pressures at time points:  $a - 0,012$  s;  $б - 0,013$  s;  $в - 0,016$  s;  $г - 0,03$  s]

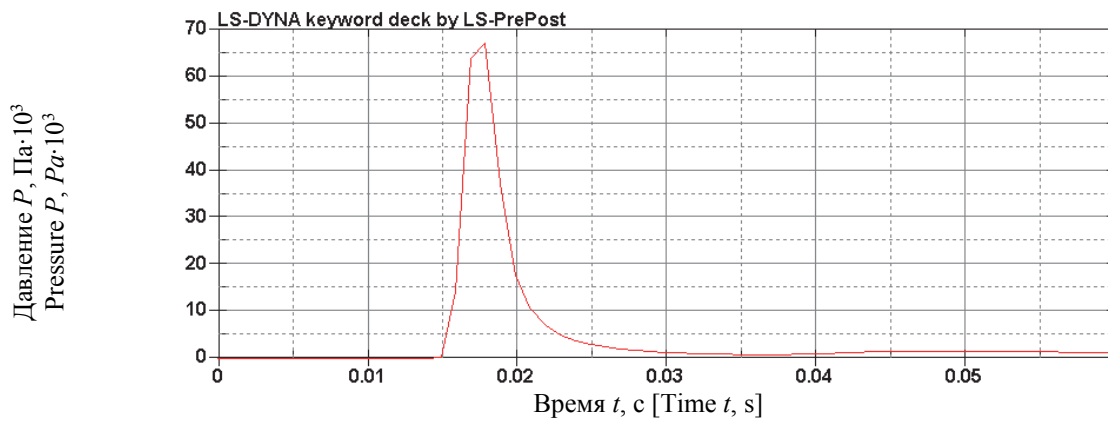


Рис. 5. График приращения давления  $\Delta P_{\phi}$  во времени на расстоянии 7 м от центра взрыва  
 [Figure 5. Graph of pressure increment  $\Delta P_{\phi}$  in time at a distance of 7 m from the center of the explosion]

**Моделирование приходящего фронта ВУВ при больших расстояниях от места взрыва.** Во многих практических задачах, например при расчете сооружений гражданской обороны<sup>2</sup>, эпицентр

взрыва располагается на значительном (5–10 км) удалении, что заметно увеличивает размерность задачи и время расчета. Поэтому для моделирования приходящего фронта ударной волны можно воспользоваться теорией подобия при взрывах [7], задав при этом вместо одного заряда, например, 10, как показано на рис. 6.

<sup>2</sup> СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77\*.

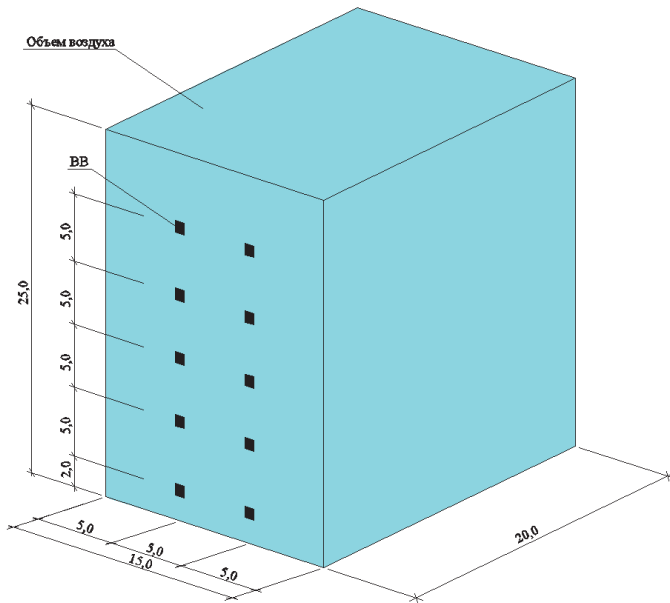


Рис. 6. Конечно-элементная модель воздушного пространства  
[Figure 6. Finite element model airspace]

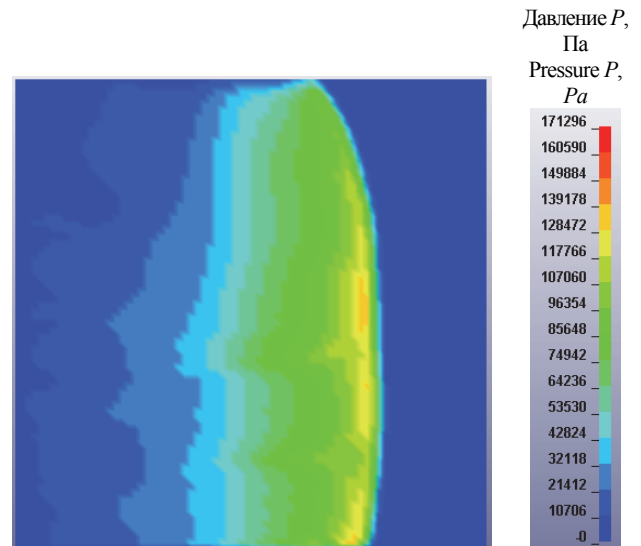


Рис. 7. Распространение фронта ударной волны  
[Figure 7. Shock wave propagation]

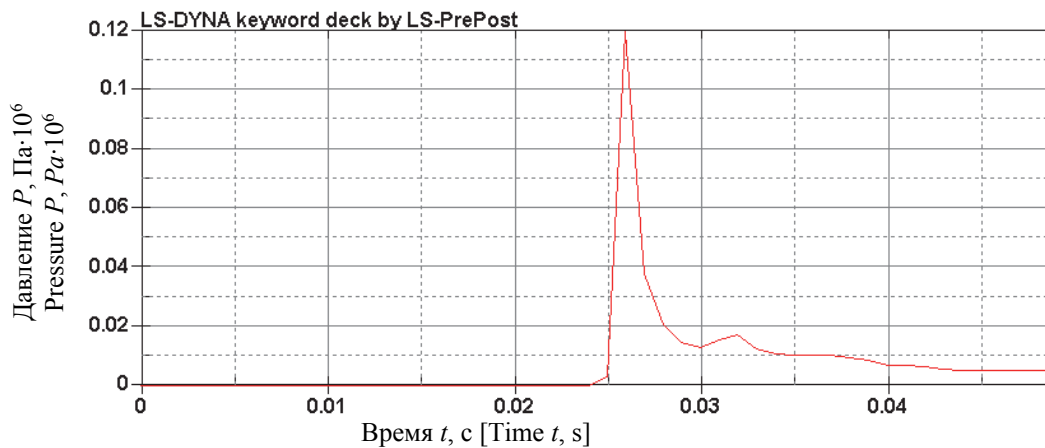


Рис. 8. График приращения давления  $\Delta P_\phi$  во времени на расстоянии 15 м от центра взрыва  
[Figure 8. Graph of pressure increment  $\Delta P_\phi$  in time at a distance of 15 m from the center of the explosion]

Таким образом, используя свойства отражения волн, 10 зарядов сформируют головную ударную волну с практически одинаковыми параметрами во фронте (рис. 7). В рассматриваемом примере давление во фронте ВУВ на расстоянии 15 м от центра взрыва составило  $0,12 \cdot 10^6$  Па = 1,21 кгс/см<sup>2</sup> (рис. 8). Время фазы сжатия составило 0,045 с.

### Выводы

Рассмотренный подход позволяет получить параметры ВУВ во фронте для дальнейшего использования при расчете строительных конструкций.

Используя описанный подход можно вычислить максимальное давление во фронте ударной волны при взрыве для зданий и сооружений, рас-

положенных на различном расстоянии от центра взрыва. При этом можно определить параметры ВУВ для различных конструктивных элементов (стены, покрытие и т.д.), т.е. учесть полную картину воздействия ударной волны на сооружение.

© Мкртычев О.В., Савенков А.Ю., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

### Список литературы

1. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А. и др. Физика взрыва: в 2 т. / под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 832 с.

2. *Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З.* Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М.: АСВ, 2007. 152 с.

3. *Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю.* Экстремальные воздействия на сооружения. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 594 с.

4. *Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г.* Нестационарные воздействия ударных волн. М.: Наука, 1977. 274 с.

5. *Бате К., Вилсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.

6. *Van Leer B.J.* Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's Method // *J. Comput. Phys.* 1979. Vol. 32. No. 1. Pp. 10–136.

7. *Садовский М.А.* Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований // *Физика взрыва: сборник № 1 научно-исследовательских работ в области физики взрыва / АН СССР, Ин-т хим. физики.* М.: Изд-во АН СССР, 1952. С. 20–110.

8. LS-DYNA. Keyword user's manual. Volume I. May 2017. Version 971. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). URL: [www.dynasupport.com](http://www.dynasupport.com).

9. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Анализ подходов к определению параметров взрывного воздействия // *Вестник МГСУ.* 2012. № 5. С. 45–49.

10. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Безопасность зданий и сооружений при взрывных воздействиях // *Вестник НИЦ «Строительство».* Вып. 3–4 (XXVIII) / под ред. И.И. Ведякова, Г.С. Варданяна. М.: НИЦ Строительство, 2011. С. 21–34.

11. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б.* Вероятностное моделирование взрывного воздействия // *Вестник МГСУ.* 2012. № 11. С. 278–282.

12. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б., Лазарев О.В.* Расчет конструкций железобетонного здания на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке // *Вестник МГСУ.* 2011. № 4. С. 243–247.

13. *Мкртычев О.В., Дорожгинский В.Б., Сидоров Д.С.* Надежность строительных конструкций при взрывах и пожарах. М.: АСВ, 2016. 173 с.

#### **Об авторах**

**Мкртычев Олег Вартанович** – доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (Москва, Россия). Опубликовал более 150 научных статей, монографий и учебных пособий. eLIBRARY SPIN-код: 9676-4986. *Область научных интересов:* теория надежности строительных конструкций, вероятностные методы расчетов, теория сейсмостойкости сооружений, численные методы расчета, нелинейные динамические методы расчета, математическое и численное моделирование работы зданий и сооружений. *Контактная информация:* e-mail – [mkrtychev@yandex.ru](mailto:mkrtychev@yandex.ru)

**Савенков Антон Юрьевич** – аспирант кафедры сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ) (Москва, Россия). Научный руководитель – доктор технических наук, профессор О.В. Мкртычев. eLIBRARY SPIN-код: 8652-8088. *Область научных интересов:* нелинейные динамические методы расчета, численные методы расчета. *Контактная информация:* e-mail – [savenkov.asp@mail.ru](mailto:savenkov.asp@mail.ru)

#### **Для цитирования**

*Мкртычев О.В., Савенков А.Ю.* Численное моделирование фронта воздушной ударной волны при взрыве в воздухе и над землей в программном комплексе LS-DYNA // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* 2018. Т. 14. № 6. С. 467–474. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474

RESEARCH PAPER

## **Numerical simulation of the front of an air shock wave in a ground and air explosion in the software package LS-DYNA**

**Oleg V. Mkrtychev, Anton Y. Savenkov\***

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

\*Corresponding author

(received: August 27, 2018; revised: November 09, 2018; accepted: November 12, 2018)

**Abstract. Introduction and objectives.** When calculating buildings and structures for special combinations of loads caused by the action of air shock waves, it is necessary to determine the main parameters of the actual load. The regulatory approach implemented in modern regulatory documents proposes the use of simplified calculation methods based on the use of equivalent static loads. The aim of the study is to obtain the basic parameters of air shock waves, as well as to consider the nature of the propagation of the shock wave front during an explosion on the ground and in the air, using numerical simulation.

**Materials and methods.** To obtain the basic parameters of air shock waves, high-precision numerical methods implemented in the modern LS-DYNA software package are considered. To describe the explosion process, the Lagrangian-Eulerian approach is used.

**Results.** Isopoles and graphs of excess overpressure  $\Delta P_{\phi}$  over atmospheric pressure in an air shock wave were obtained when the epicenter of the explosion was located at ground level and in the air, as well as at a distance from the designed structure.

**Conclusions.** The considered method of numerical simulation allows to obtain the main parameters of air shock waves, which can be used for further calculation of building structures.

**Keywords:** reinforced concrete structures, explosive effects, air shock wave, nonlinear dynamics, explicit dynamics, finite element method, numerical methods

## References

1. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imhovich N.A. et al. (2004). *Fizika vzryva. T. 2 [Physics of a Blast. Vol. 2]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 832. (In Russ.)
2. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. (2007). *Proektirovaniye zdaniy i sooruzheniy pri avariynnykh vzryvnykh vozdeystviyakh [Design of Buildings and Structures Exposed to Emergency Blast Effects]*. Moscow, ASV Publ., 152. (In Russ.)
3. Birbraer A.N., Roleder A.Yu. (2009). *Ekstremal'nye vozdeystviya na sooruzheniya [Extreme Impacts on Structures]*. Saint Petersburg, Politekhnikeskii universitet Publ., 594. (In Russ.)
4. Bazhenova T.V., Gvozdeva L.G. (1977). *Nestatsionarnyye vozdeystviya udarnykh voln [Unsteady shock wave action]*. Moscow, Nauka Publ., 274. (In Russ.)
5. Bate K., Vilson Ye. (1982). *Chislennyye metody analiza i metoda konechnykh elementov [Numerical analysis methods and finite element method]*. Moscow, Stroyizdat Publ., 448. (In Russ.)
6. Van Leer B.J. (1979). Towards the ultimate conservative difference scheme. Second-order sequel to Godunov's Method. *J. Comput. Phys.*, 32(1), 101–136. (In Dutch)
7. Sadovskiy M.A. (1952). *Mekhanicheskoye vozdeystviye vozdukhnykh udarnykh voln po dannym eksperimental'nykh issledovaniy [Mechanical action of air shock waves according to experimental studies]*. *Fizika vzryva: sb. trudov v oblasti fiziki vzryva*, (1), 20–110. Moscow, In-t khim. i fiziki, AN SSSR Publ. (In Russ.)
8. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (May 2017). *LS-DYNA. Keyword user's manual. Volume I. Version 971*. Retrieved from [www.dynasupport.com](http://www.dynasupport.com)
9. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. (2012). Analiz podkhodov k opredeleniyu parametrov vzryvnogo vozdeystviya [Analysis of approaches to identification of parameters of blast effects]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, (5), 45–49. (In Russ.)
10. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. (2011). Bezopasnost' zdaniy i sooruzheniy pri vzryvnykh vozdeystviyakh [Safety of Buildings and Structures Exposed to Blast Effects]. In I.I. Vedyakov, G.S. Vardanyan (Eds.). *Vestnik NITs "Stroitel'stvo". Issledovaniya po teorii sooruzheniy [Proceedings of Construction Scientific and Research Center. Structural Theory Research]*, XXVIII(3–4), 21–34. (In Russ.)
11. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. (2012). Veroyatnostnoye modelirovaniye vzryvnogo vozdeystviya [Probabilistic modeling of explosive loading]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, (11), 278–228. (In Russ.)
12. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Lazarev O.V. (2011). Raschet konstruksiy zhelezobetonnoy zdaniya na vzryvnyye nagruzki v nelineynoy dinamicheskoy postanovke [The calculation of reinforced concrete buildings constructions on the explosive loads in the nonlinear dynamic formulation]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, (4), 243–247. (In Russ.)
13. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Sidorov D.S. (2016). *Nadezhnost' stroitel'nykh konstruksiy pri vzryvakh i pozharakh [Reliability of building structures during explosions and fires]*. Moscow, ASV Publ., 173. (In Russ.)

### About the authors

**Oleg V. Mkrtychev** – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Moscow, Russia). He published more than 150 scientific articles, monographs and textbooks. eLIBRARY SPIN-code: 9676-4986. *Research interests*: the theory of reliability of building structures, probabilistic methods of calculation, the theory of seismic stability of structures, numerical methods of calculation, nonlinear dynamic methods of calculation, mathematical and numerical modeling of buildings and structures. *Contacts*: e-mail – [mkrtychev@yandex.ru](mailto:mkrtychev@yandex.ru)

**Anton Y. Savenkov** – post-graduate student, student of the Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (Moscow, Russia). Scientific supervisor – Dr Sci. (Eng.), Professor Oleg Mkrtychev. eLIBRARY SPIN-code: 8652-8088. *Research interests*: nonlinear dynamic methods of calculation, numerical calculation methods. *Contacts*: e-mail – [savenkov.asp@mail.ru](mailto:savenkov.asp@mail.ru)

### For citation

Mkrtychev O.V., Savenkov A.Y. (2018). Numerical simulation of the front of an air shock wave in a ground and air explosion in the software package LS-DYNA. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(6), 467–474. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474 (In Russ.)