ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 666.8:533:004.94

DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.223-234

Методы моделирования фронта воздушной ударной волны для расчета промышленного сооружения

О.В. Мкртычев, А.Ю. Савенков

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрены существующие методы моделирования широкого фронта воздушной ударной волны (ВУВ) для решения задачи взаимодействия ударной волны с сооружением с использованием методов газодинамики. При решении задачи взаимодействия ВУВ с сооружением в динамической постановке установлено, что при моделировании широкого фронта дальнего взрыва с использованием точечных взрывов можно получить заниженное время действия ударной волны. Это влечет за собой занижение значений нагрузок на сооружение. Таким образом, полученные при этом нагрузки не соответствуют нагрузкам, на которые необходимо выполнять расчет промышленных сооружений, защищенных от ударной волны в соответствии с отечественными и международными нормативными документами. Для устранения этого недостатка предложен другой подход, заключающийся в задании нагрузки на расчетную область в виде графика давления с заданными параметрами избыточного давления и времени действия.

Материалы и методы. Взаимодействие фронта ударной волны с сооружением производится с помощью численного моделирования в нелинейной динамической постановке с использованием методов газодинамики в программном комплексе LS-DYNA.

Результаты. Выполнен анализ существующих методов формирования широкого фронта дальнего взрыва; анализ параметров ударной волны при формировании широкого фронта дальнего взрыва с помощью задания графика давления с заданными параметрами избыточного давления и времени воздействия.

Выводы. Результат анализа методов численного моделирования взаимодействия широкого фронта воздушной ударной волны с сооружением показал, что моделирование источника взрыва в виде объемных элементов и моделирование ударной волны с помощью функции CONWEP в программном комплексе LS-DYNA имеет недостатки, которые не позволяют получить основные параметры ударной волны для дальнейшего их использования. Приведен метод моделирования широкого фронта ударной волны путем задания на границе расчетной области графика давления с требуемыми параметрами избыточного давления и временем воздействия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аварийные взрывные воздействия, широкий фронт ударной волны, нелинейная газодинамика, фаза сжатия, фаза разряжения, импульс ударной волны, время действия фазы сжатия, промышленные сооружения, Ambient-элементы, эйлеровы сетки, функция CONWEP

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Мкртычев О.В., Савенков А.Ю. Методы моделирования фронта воздушной ударной волны для расчета промышленного сооружения // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 223–234. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.223-234

Methods of simulating the front of the air shock wave for calculating the industrial structure

Oleg V. Mkrtychev, Anton Y. Savenkov

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The paper considers existing methods of simulating a wide front of an air shock wave for solving problems of shock wave interaction with an installation using gas-dynamic methods. When solving the problem of the air shock wave interaction with an installation in a dynamic setting, it was revealed that, when simulating a wide front of a distant explosion using point explosions, it is possible to obtain an underestimated time of the shock wave action. This results in a downward bias of loads to the installation. Thus, the loads obtained in this case do not correspond to the loads for which it is necessary to carry out the calculation of industrial installations protected from shock waves in accordance with domestic and international regulatory documents. To eliminate this drawback, another approach is proposed. It consists in setting the load on the computational region in the form of a pressure graph with specified parameters of overpressure and exposure time.

Materials and methods. The interaction of the shock wave front with the installation is carried out using numerical simulation in a nonlinear dynamic setting using gas-dynamic methods in the LS-DYNA software package.

Results. The following analyses were conducted in the scope of the study: an analysis of existing methods of forming the wide shock wave front of the distant explosion and an analysis of the parameters of the shock wave during the formation of the wide shock wave front of the distant explosion by setting the pressure graph with the specified parameters of the overpressure and the exposure time.

Conclusions. The result of the analysis of methods for numerical simulation of the interaction of the air shock wave wide front with the installation showed that simulation of the explosion source in the form of volume elements and simulation of the shock wave using the CONWEP function of the LS-DYNA software package have disadvantages. These disadvantages do not allow obtaining the main parameters of the shock wave for the further use. A method for modeling the wide shock wave front is given by setting a pressure graph at the boundary of the computational region with the required overpressure parameters and exposure time.

KEYWORDS: emergency blast effects, wide shock wave front, nonlinear gas dynamics, compression phase, vacuum phase, shock wave impulse, compression phase exposure time, industrial installations, ambient elements, Eulerian nets, CONWEP-function

FOR CITATION: Mkrtychev O.V., Savenkov A.Y. Methods of simulating the front of the air shock wave for calculating the industrial structure. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(2):223-234. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.223-234 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве для всех зданий и сооружений в обязательном порядке должны выполняться требования Федерального закона № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». В связи с этим для некоторых промышленных сооружений рассматриваются аварийные взрывные воздействия. К таким сооружениям могут относиться инфраструктурные сооружения атомных электростанций, космодромов, убежища гражданской обороны (ГО) и т.д. Согласно нормативным документам^{1, 2, 3} а также работам [1–4] такие сооружения рассчитываются на приходящую воздушную ударную волну (далее — ВУВ) широкого фронта. Широким фронтом ВУВ будем называть фронт сильного детонационного взрыва, эпицентр которого находится на значительном удалении от рассчитываемого сооружения (0,5–5 км). При взаимодействии с сооружением ударные волны такого взрыва имеют практически одинаковые параметры во фронте. Природой данных ударных волн могут быть чрезвычайные ситуации природного или техногенного характера и именно поэтому такие ситу-

ации рассматриваются при расчете вышеуказанных сооружений.

Как известно, ВУВ распространяется в атмосфере со сверхзвуковой скоростью в виде фазы сжатия и последующей за ней фазы разряжения (см. рис. 1). В фазе сжатия давление скачком повышается от атмосферного P_0 до значения $P_0 + \Delta P_\phi$ во фронте волны, затем за время τ_+ убывает. По окончании этого времени начинается фаза разряжения, которая проходит за время τ_- . Динамический эффект на строительные конструкции от фазы разряжения невелик ввиду плавного нарастания отрицательного давления (время фазы разряжения в 10 и более раз дольше фазы сжатия). Поэтому для расчета конструкций наибольший интерес представляет фаза сжатия, так как именно в ней создаются наибольшие нагрузки на конструктивные элементы сооружения. Таким образом, основными параметрами при расчете сооружений на ВУВ является избыточное давление ΔP_ϕ и время действия фазы сжатия.

Согласно нормативным документам расчет сооружений I категории в границе застройки АЭС выполняется на давление во фронте 30 кПа с временем действия до 1 с. Параметры воздействия на такие сооружения также можно найти в нормах Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)⁴, где профиль давления имеет продолжительность фазы сжатия 0,2–0,25 с при давлении во фронте

¹ ПИН АЭ-5.6-86. Нормы строительного проектирования атомных станций с реакторами различного типа. М. : Минатомэнерго РФ, 1986.

² НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97). Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97. М. : Госатомнадзор России, 1998.

³ СП 88.13330.2014. Защитные сооружения гражданской обороны. Актуализированная редакция СНиП II-11-77*. М. : Минстрой России, 2014. 118 с.

⁴ Оценка безопасности установок и деятельности. Общие требования безопасности, № GSR, Part 4 // Нормы МАГАТЭ по безопасности для защиты людей и охраны окружающей среды. Вена : Международное агентство по атомной энергии, 2009.

Рис. 1. График изменения давления во фронте ударной волны

Fig. 1. Graphs of pressure in shock wave front

до 30 кПа, что подчеркивает консервативность отечественных подходов. Что касается сооружений ГО на той же площадке, то их расчет выполняется на давление 200 кПа, а сооружений вне площадки границы застройки АЭС, т.е. общегражданских сооружений ГО, выполняется на давление 100 кПа. При этом время действия на такие сооружения не указывается [1].

Наиболее эффективно задачи взаимодействия ударных волн с сооружениями решаются с использованием методов газодинамики в нелинейной динамической постановке в программном комплексе LS-DYNA. Например, в такой постановке в работах [5, 6] показан расчет на возможный взрыв при террористических атаках на жилые дома, в труде [7] приведено решение задачи взаимодействия ударных волн точечных взрывов с сооружениями произвольной формы, а в работе [8] — распространение ударных волн в городской застройке. Основным принципом таких расчетов с использованием методов газодинамики является исследование взаимодействия ударной волны с сооружением, помещенным в некоторую расчетную область, элементами которой чаще всего выступают воздух при надземном или грунт при подземном сооружении.

Цель исследования — изучение существующих методов моделирования широкого фронта ВУВ для решения задачи взаимодействия ударной волны с сооружением с использованием методов газодинамики, а при недостатке методик предложение своего варианта решения проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В программном комплексе LS-DYNA 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 используется эйлеров подход⁵, который построен на принципе исследования поведения сред, движущихся через неподвижную расчетную сетку. При этом все параметры среды рассматриваются как функции координат и времени, что дает наилучший результат в процессе изучения поведения жидкостей или газов.

Решение газодинамической задачи в эйлеровой формулировке основывается на трех составляющих:

- 1) Уравнение сохранения массы:

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

где $\dot{\rho}$ — производная плотности по времени; $\mathbf{v}$ — вектор скорости.

- 2) Уравнение сохранения количества движения:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \operatorname{grad}(p), \quad (2)$$

где $\dot{\mathbf{v}}$ — вектор ускорения заданной частицы среды, при движении в пространстве среды; $\mathbf{f}$ — вектор

⁵ LS-DYNA. Keyword user's manual. 2017. Vol. I. Version 971. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). URL: <https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna-manual-r-8.0-vol-iii>

массовых сил, отнесенный к единице массы; p — давление.

3) Уравнение сохранения энергии:

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

где E — внутренняя энергия газа, отнесенная к единице массы.

Воздушное пространство описывается полиномиальным уравнением состояния идеального газа:

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_{ipv0}, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1, \quad (5)$$

где $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ — безразмерные константы полиномиального уравнения, принимаются по справочным данным; E_{ipv0} — удельная начальная внутренняя энергия газа, определяемая по формуле:

$$E_{ipv0} = \rho_0 C_v T, \quad (6)$$

где C_v — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; T — начальная температура газа; ρ — текущая плотность газа; ρ_0 — плотность газа в начальном состоянии;

В LS-DYNA решение газодинамической задачи в эйлеровой формулировке выполняется с помощью метода конечных разностей [9]. Для аппроксимации уравнений в работе использован метод Годунова второго порядка точности по пространству [10]. Интегрирование уравнений по времени осуществляется с помощью явной схемы второго порядка точности (метод центральных разностей) с соблюдением условия устойчивости решения по критерию Куранта.

Среди существующих методик моделирования нагрузок для решения задачи взаимодействия ударной волны с сооружением [5–8, 11–24] с использованием методов газодинамики, можно отметить, что эти методы используют точечные взрывы в двух вариантах:

Моделирование взрыва производится с помощью взрывчатого вещества, заключенного в рамки одного или нескольких объемных конечных элементов [5–8, 11, 13–15, 17, 20–24]. Такой метод позволяет получать параметры взрыва в любой точке фронта ударной волны. Но расстояние от эпицентра взрыва до сооружения, как правило, не большое, так как при больших расстояниях время задачи существенно увеличивается, а задание какого-либо сильного взрыва с формированием широкого фронта от приходящего дальнего взрыва, делает задачу в данной постановке вовсе не выполнимой.

Формирование нагрузок с помощью функции CONWEP⁵ и использование Ambient-элементов. Функция CONWEP является реализацией экспериментальной модели Кингери и Бэлмаша (Kingery and Bulmash) для ВУВ, которая была получена с использованием компиляции результатов тысяч эксперимен-

тов с точечными воздушными и наземными взрывами. Данную функцию многие авторы [11, 16, 18, 19] используют в сочетании с Ambient-элементами для получения процесса взаимодействия с различными конструктивными элементами сооружений. Суть этого подхода заключается в том, что только воздух, непосредственно окружающий конструкции, должен быть смоделирован с помощью эйлеровых сеток, а эффекты взрыва применяются к внешней поверхности этого воздушного слоя (Ambient-элементы) с дальнейшим преобразованием ее в данные термодинамического состояния воздуха. В таком подходе нет необходимости моделировать взрывчатое вещество или воздух между взрывчатым веществом (далее — ВВ) и конструкциями, а для эмпирических уравнений требуется только задание массы заряда и его положения относительно конструкции.

Так как промышленные сооружения, защищенные от ВУВ, в основном рассчитываются на приходящий к сооружениям широкий фронт, то ставится вопрос о том, возможно ли использование этих двух подходов для их расчета? По указанным недостаткам первого подхода можно отметить, что первый все же имеет более эффективное применение только для точечных взрывов небольшой мощности. Второй метод рассмотрим более подробно.

В работе [12] указывается, что использование функции CONWEP дает хорошую картину взаимодействия ударной волны с сооружением, но полученное время фазы сжатия имеет небольшие значения $\tau_+ = 0,027$ с. Возможно, это связано с небольшим расстоянием (40 м) от эпицентра взрыва. Поэтому рассмотрим, как влияет изменение расстояния от эпицентра взрыва до сооружения на время действия фазы сжатия ударной волны, потому что, как известно, продолжительность фазы сжатия увеличивается по мере увеличения расстояния от места взрыва.

Для этого рассмотрим задачу о прохождении фронта ВУВ, генерируемого с помощью функции CONWEP, через призму с произвольными размерами $15 \times 15 \times 9$ м (рис. 2).

Расчетная область представляет собой объем воздуха с начальными параметрами, соответствующими нормальным атмосферным условиям: плотностью $\rho_0 = 1,225$ кг/м³; температурой $T = 298,15$ К; статическим давлением $E_0 = 101\,325$ Па; теплоемкостью $C_p = 1004$ Дж·К/кг; коэффициенты $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$, $C_4 = C_5 = 0,4$ [25, 26]. Взрывчатое вещество ТНТ зададим массой 3000, 45 000, 150 000 кг при расстоянии до контрольной точки Т1 40, 100, 150 м соответственно. Массы и расстояния подобраны таким образом, чтобы давление во фронте во всех трех случаях было бы одинаковым. Нижняя граница призмы имеет жесткое закрепление. На внешних границах расчетной области приме-

нены неотражающие граничные условия [27], обеспечивающие выход давления за границы области. Давление измеряется в контрольной точке T1.

Принципиальная схема расчетной модели представлена на рис. 2.

В результате расчета получены графики давления в контрольной точке T1 (см. рис. 3) для трех масс ВВ и расстояний от эпицентра взрыва. Время действия фазы сжатия для взрыва на расстоянии 40 м составило 0,027 с. На расстоянии 100 м время увеличилось до 0,04 с. При дальнейшем увеличении

расстояния до 150 м время также составило 0,04 с. Из чего можно сделать вывод, что при дальнейшем увеличении расстояния время фазы сжатия не изменится. Это объясняется использованием в функции CONWEP результатов эмпирических данных точечных взрывов, для которых характерно очень короткое, порядка сотых долей секунды, время действия.

В результате анализа вышеописанных методов моделирования фронта ударной волны можно сделать вывод о том, что оба метода не могут быть применены для описания широкого фронта приходящей ударной

Рис. 2. Схема расчетной модели для функции CONWEP

Fig. 2. Calculation model for CONWEP function

Рис. 3. Графики изменения давления ΔP_ϕ во времени в точке T1

Fig. 3. Pressure graphs ΔP_f over time at the point T1

волны с параметрами во фронте, соответствующим требуемым в отечественных и мировых нормативных документах. Поэтому появляется необходимость в других методах задания нагрузки на границу расчетной области и в данной работе предлагается метод моделирования с помощью задания на границе расчетной области графика с заданными параметрами избыточного давления и временем действия.

Рассмотрим применение данного метода к расчетной области вышеуказанного примера. Только

на границе расчетной области будем прикладывать нагрузку в виде графика (рис. 5) с давлением во фронте 30 кПа и временем действия фазы сжатия $\tau_+ = 0,25$ с. Такие параметры соответствуют нагрузкам, указанным в нормах⁴ для проектирования зданий АЭС. В центр расчетной области поместим сооружение размером $8 \times 8 \times 6$ м, моделируемое объемными твердыми телами.

Принципиальная схема расчетной модели представлена на рис. 4.

Рис. 4. Схема расчетной модели при задании нагрузки в виде графика давления

Fig. 4. Calculation model when setting the load in the form of pressure graph

Рис. 5. График изменения давления ΔP_ϕ во времени прикладываемый к границе расчетной области

Fig. 5. Pressure graph ΔP_f over time applied to the computational region

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате сравнения исходного воздействия (рис. 5) с графиком давления в контрольной точке T1 (рис. 6) показано, что давление в расчетную область передается без искажений. По изополям давлений

на рис. 7–9 можно увидеть отражение, дифракцию, и последующее схлопывание волн за сооружением, т.е. полную картину взаимодействия ВУВ с сооружением. На рис. 10 показаны графики давления на различных сторонах сооружения.

Рис. 6. Графики изменения давления ΔP_ϕ во времени в точке T1

Fig. 6. Pressure graphs ΔP_f over time at the point T1

Рис. 7. Изополя давлений на высоте 4 м от поверхности земли, Па, (вид сверху), в моменты времени: a — 0,0145 с; b — 0,018 с

Fig. 7. Pressure isofields at the height of 4m from the ground surface, Pa, (view from above) at time points: a — 0.0145 s; b — 0.018 s

Рис. 8. Изополя давлений на высоте 4 м от поверхности земли, Па, в моменты времени: a — 0,032 с; b — 0,04 с
Fig. 8. Pressure isofields at the height of 4m from the ground surface, Pa, (view from above) at time points: a — 0.032 s; b — 0.04 s

Рис. 9. Изополя давлений (в плоскости XOZ по центру сооружения), Па, в моменты времени: a — 0,012 с; b — 0,032 с
Fig. 9. Pressure isofields, Pa, (in the plane XOZ at the centre of the installation) at time points: a — 0.012 s; b — 0.032 s

Рис. 10. Графики изменения давления ΔP_{ϕ} во времени, полученные на фронтальной, боковой, верхней и тыльной сторонах сооружения

Fig. 10. Pressure graphs ΔP_{ϕ} over time obtained on front, side, top and back walls of installation

ВЫВОДЫ

В результате сравнительного анализа существующих методов моделирования широкого фронта при решении задачи взаимодействия ВУВ с сооружением в газодинамической постановке, можно сделать выводы о том, что, действительно, при точечных взрывах можно получить короткое, порядка сотых долей секунды, время действия нагрузки. Таким образом можно получить более низкие нагрузки на сооружение, по сравнению с нагрузками, указанными в нормах проектирования промышленных сооружений. Поэтому предложен метод, который заключается в задании графика давления на грани-

це расчетной области со всеми необходимыми параметрами во фронте волны (ΔP_{ϕ} , τ) в соответствии с действующими нормативными документами. Также такой метод показал достаточно удовлетворительную картину взаимодействия ударных волн с сооружением, соответствующую действительной картине дифракции.

Кроме этого, проведенное исследование демонстрирует, что с совершенствованием современных методов моделирования, в которых все чаще используются методы динамики сооружения, необходимо также и совершенствование нормативных документов³, где, например, необходимо дать указания о времени действия нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирбраер А.Н., Роleder А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб. : Издательство Политехнического университета, 2009. 593 с.
2. Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. 550 с.
3. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях. М. : Изд-во АСВ, 2007. 152 с.
4. Bryukhan F. Consideration of hazardous and especially hazardous hydrometeorological impacts in design of buildings and structures of nuclear power plants // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 86. P. 04005. DOI: 10.1051/mateconf/20168604005
5. Мкртычев О.В., Дорожнинский В.Б. Анализ подходов к определению параметров взрывного воздействия // Вестник МГСУ. 2012. № 5. С. 45–49. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.5
6. Мкртычев О.В., Дорожнинский В.Б., Лазарев О.В. Расчет конструкций железобетонного здания на взрывные нагрузки в нелинейной динамической постановке // Вестник МГСУ. 2011. № 4. С. 243–247.
7. Павлов А.С. Численное моделирование взрывных воздействий на здания и сооружения про-

извольной формы // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 108–112.

8. Вальгер С.А. Создание вычислительных технологий для расчета ветровых и ударно-волновых воздействий на конструкции : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2016. 16 с.

9. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М. : Стройиздат, 1982. 447 с.

10. Van Leer B. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method // Journal of Computational Physics. 1979. Vol. 32. Issue 1. Pp. 101–136. DOI: 10.1016/0021-9991(79)90145-1

11. 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

12. Савенков А.Ю., Мкртычев О.В. Нелинейный расчет железобетонного сооружения на воздействие воздушной ударной волны // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 1. С. 33–45. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.33-45

13. Новожилов Ю.В. Методики моделирования взрывов в LS-DYNA // XIV Международная конференция пользователей CADFEM/ANSYS, Санкт-Петербург, 2017.

14. Илюшкин М.В. Материалы для подготовки курса лекций для повышения квалификации специалистов по моделированию процессов ОМД. Ульяновск, 2017. 125 с. URL: <http://tzshp.ru>

15. Schwer L., Teng H., Souli M. LS-DYNA air blast techniques: comparisons with experiments for close-in charges // 10th European LS-DYNA Conference, Würzburg, Germany, 2015.

16. Bento Rebelo H., Cismaşiu C. A comparison between three air blast simulation techniques in LS-DYNA // 11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria. 2017.

17. Andrade F., Feucht M. A comparison of damage and failure models for the failure prediction of dual-phase steels // 11th European LS-DYNA Conference. Salzburg, Austria, 2017.

18. Zahra S. Tabatabaei, Jeffery S. Volz. A comparison between three different blast methods in LS-

DYNA®: LBE, MM-ALE, Coupling of LBE and MM-ALE // 12th International LS-DYNA® Users Conference. 2012. 10 p. URL: <https://www.dynalook.com/12th-international-ls-dyna-conference/blast-impact20-d.pdf>

19. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction // International Journal of Fracture. 2016. Vol. 200. Issue 1–2. Pp. 127–150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2

20. Goel M., Vasant M., Gupta A. An abridged review of blast wave parameters // Defence Science Journal. 2012. Vol. 62. Issue 5. Pp. 300–306. DOI: 10.14429/dsj.62.1149

21. Zhang C., Gholipour G., Mousavi A.A. Nonlinear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading // Engineering Structures. 2019. Vol. 181. Pp. 124–142. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.014

22. Astarlioglu S., Krauthammer T., Morency D., Tran T.P. Behavior of reinforced concrete columns under combined effects of axial and blast-induced transverse loads // Engineering Structures. 2013. Vol. 55. Pp. 26–34. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.040

23. Hong J., Fang Q., Chen L., Kong X. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 155. Pp. 1013–1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.060

24. Qu Y., Li X., Kong X., Zhang W., Wang X. Numerical simulation on dynamic behavior of reinforced concrete beam with initial cracks subjected to air blast loading // Engineering Structures. 2016. Vol. 128. Pp. 96–110. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.09.032

25. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Илюховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И. и др. Физика взрыва. 3-е изд., испр., в 2-х т. М. : Физматлит, 2004. 832 с.

26. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. Нестационарные взаимодействия ударных волн. М. : Наука, 1977. 274 с.

27. Grote M.J., Sim I. On local nonreflecting boundary conditions for time dependent wave propagation // Chinese Annals of Mathematics, Series B. 2009. Vol. 30. Issue 5. Pp. 589–606. DOI: 10.1007/s11401-009-0203-5 URL: <https://www.researchgate.net/publication/225659814>

Поступила в редакцию 27 июля 2019 г.

Принята в доработанном виде 5 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 31 января 2020 г.

О Б АВТОРАХ: Олег Варганович Мкртычев — доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный универ-

ситет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе д. 26; SPIN-code: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Антон Юрьевич Савенков — аспирант кафедры сопротивления материалов; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе д. 26; SPIN-code: 8652-8088; sopromat@mgsu.ru.

REFERENCES

1. Birbraer A.N., Roleder A.J. *Extreme actions on structures*. St. Petersburg, Publishing House of the Politechnical University, 2009; 594. (rus.).
2. Sargsyan A.E. *Dynamics and seismic resistance of nuclear power plants*. Sarov, RFYATS-VNIIEF Publ., 2013; 550. (rus.).
3. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Design of buildings and structures exposed to emergency blast effects*. Moscow, ASV Publ., 2007; 152. (rus.).
4. Bryukhan F. Consideration of hazardous and especially hazardous hydrometeorological impacts in design of buildings and structures of nuclear power plants. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 86:04005. DOI: 10.1051/mateconf/20168604005
5. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B. Analysis of approaches to identification of parameters of blast effects. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012; 5:45-49. DOI: 10.22227/1997-0935.2012.5 (rus.).
6. Mkrtychev O.V., Dorozhinskiy V.B., Lazarev O.V. The calculation of reinforced concrete buildings constructions on the explosive loads in the non-linear dynamic formulation. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011; 4:243-247. (rus.).
7. Pavlov A.S. Numerical method of calculation of blast loads pressure to structures with complex geometry shapes. *Academia. Architecture and Construction*. 2017; 3:108-112. (rus.).
8. Walger S.A. *Creation of computing technologies for calculating wind and shock-wave effects on structures : auto-ref. diss ... cand. physical and mathematical. sciences*. Novosibirsk, 2015; 16. (rus.).
9. Bathe K., Wilson E. *Numerical methods in finite element analysis*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982; 447. (rus.).
10. Van Leer B.J. Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method. *Journal of Computational Physics*. 1979; 32(1):101-136. DOI: 10.1016/0021-9991(79)90145-1
11. Mkrtychev O.V., Savenkov A.Y. 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*. 2018; 14(6):467-474. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-6-467-474 (rus.).
12. Savenkov A.Y., Mkrtychev O.V. Nonlinear calculation of reinforced concrete structures to the impact of the air shock wave. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(1):33-45. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.1.33-45 (rus.).
13. Novozhilov Yu.V. Explosion modeling techniques in LS-dyna. *XIV International Conference of Users CAD-FEM/ANSYS*, St. Petersburg, 2017. (rus.).
14. Ilyushkin M.V. *Materials for the preparation of a course of lectures to improve the skills of specialists in the modeling of OMD processes*. Ulyanovsk, 2017; 125. URL: <http://tzshp.ru> (rus.).
15. Schwer L., Teng H., Souli M. LS-DYNA air blast techniques: comparisons with experiments for close-in charges. *10th European LS-DYNA Conference*. Würzburg, Germany, 2015.
16. Bento Rebelo H., Cismaşiu C. A comparison between three air blast simulation techniques in LS-DYNA. *11th European LS-DYNA Conference*. 2017. (rus.).
17. Andrade F. Feucht M. A Comparison of damage and failure models for the failure prediction of dual-phase steels. *11th European LS-DYNA Conference*. Salzburg, Austria, 2017.
18. Zahra S. Tabatabaei, Jeffery S. Volz. A Comparison between three different blast methods in LS-DYNA®: LBE, MM-ALE, coupling of LBE and MM-ALE. *12th International LS-DYNA® Users Conference*. 2012; 10. URL: <https://www.dynalook.com/12th-international-ls-dyna-conference/blast-impact20-d.pdf>
19. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *International Journal of Fracture*. 2016; 200(1-2):127-150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2
20. Goel M., Vasant M., Gupta A. An abridged review of blast wave parameters. *Defence Science Journal*. 2012; 62(5):300-306. DOI: 10.14429/dsj.62.1149
21. Zhang C., Gholipour G., Mousavi A.A. Non-linear dynamic behavior of simply-supported RC beams subjected to combined impact-blast loading. *Engineering Structures*. 2018; 181:124-142. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.12.014
22. Astarlioglu S., Krauthammer T., Morency D., Tran T.P. Behavior of reinforced concrete columns un-

der combined effects of axial and blast-induced transverse loads. *Engineering Structures*. 2013; 55:26-34. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.12.040

23. Hong J., Fang Q., Chen L., Kong X. Numerical predictions of concrete slabs under contact explosion by modified K&C material model. *Construction and Building Materials*. 2017; 155:1013-1024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.060

24. Qu Y., Li X., Kong X., Zhang W., Wang X. Numerical simulation on dynamic behavior of reinforced concrete beam with initial cracks subjected to air blast loading. *Engineering Structures*. 2016; 128:96-110. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.09.032

25. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imhovich N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I. et al. *Physics of a Blast*. 3rd ed., corr., in 2 vol. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004; 832. (rus.).

26. Bazhenova T.V., Gvozdeva L.G. *Non-stationary shock wave interactions*. Moscow, Science Publ., 1977; 274. (rus.).

27. Grote M.J., Sim I. On local nonreflecting boundary conditions for time dependent wave propagation. *Chinese Annals of Mathematics, Series B*. 2009; 30(5):589-606. DOI: 10.1007/s11401-009-0203-5 URL: <https://www.researchgate.net/publication/225659814>

Received July 27, 2019.

Adopted in a revised form on November 5, 2019.

Approved for publication on January 31, 2020.

B I O N O T E S : **Oleg V. Mkrtychev** — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Material Resistance; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 9676-4986, Scopus: 56449249100, ResearcherID: Q-2370-2017; MkrtychevOV@mgsu.ru;

Anton Y. Savenkov — postgraduate student of the Department of Materials Resistance; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 8652-8088; sopromat@mgsu.ru.