

УДК 531.78

DOI: 10.32326/1814-9146-2019-81-2-222-232

БЫСТРОВЗВОДИМОЕ ВРЕМЕННОЕ СООРУЖЕНИЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ МОЩНОГО ВЗРЫВА

© 2019 г. **Абакумов А.И.¹, Базаров Ю.Б.¹, Веселова Е.А.¹,
Вялых А.М.¹, Губачёв А.В.¹, Лобастов С.А.¹,
Сафронов И.И.¹, Смирнов А.С.¹, Цыпкин В.И.²**

¹*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

²*НПП «ЭКотест ЛТД», Саров, Российская Федерация*

abakumov@vniief.ru

Поступила в редакцию 21.12.2018

Предложена конструкция быстровозводимого временного сооружения, обеспечивающая снижение поражающих факторов мощного взрыва до безопасного для людей и строительных сооружений уровня. Взрывозащитное сооружение состоит из трех одиночных металлических каркасов с открытым верхом, скрепленных между собой сваркой или болтами и обшитых металлопрофилем. Внутри каждого каркаса вставлены емкости из водонепроницаемой ткани, заполняемые водой.

Выполнено численное моделирование затухания воздушной ударной волны, и проведены натурные испытания быстровозводимого временного защитного сооружения при взрыве самодельного взрывного устройства массой 100 кг в тротиловом эквиваленте, заложенного в легковом автомобиле.

Численное моделирование процесса взрыва и его воздействие на взрывозащитное сооружение проведено в гидродинамической постановке. До начала разрушения конструкции сооружение рассматривается как жесткое недеформируемое тело. По результатам расчетов сделан вывод, что прямоугольная форма надстройки сооружения более эффективна по сравнению с трапециевидной формой. Измерение параметров воздушной ударной волны осуществлялось датчиками СПК по аттестованной и зарегистрированной в Госреестре методике «СВР20-ВУВ», обеспечивающей измерение амплитуды давлений с погрешностью не более $\pm 11\%$.

Приведено сравнение результатов расчетов и испытаний предложенной конструкции взрывозащитного сооружения. Расчетные и экспериментальные данные по пиковому значению давления без сооружения удовлетворительно согласуются с формулой Садовского для наземного взрыва. Времена прихода воздушной ударной волны и максимальные давления на ее фронте в контрольных точках перед и за взрывозащитным сооружением, полученные расчетом и экспериментально, совпадают в пределах погрешности измерений.

Ключевые слова: взрывозащитное сооружение, поражающие факторы взрыва, ударная волна, элементы конструкции взрывозащитного сооружения, локализация осколков, численное моделирование, сравнение расчета с экспериментом.

Введение

Основными поражающими факторами при взрывах больших масс взрывчатых веществ (ВВ) являются воздушная ударная волна (ВУВ) и поле осколков. Так, при давлении в ВУВ, превышающем 0,5 ати, происходит практически полное разрушение строительных сооружений, а давление более 0,1 ати является опасным для человека [1, 2]. Поэтому задача снижения параметров ВУВ и локализации осколков при взрыве зарядов ВВ важна для обеспечения безопасности зданий и людей.

Вопросам определения нагрузок при воздействии ВУВ на здания и сооружения в литературе уделяется большое внимание [3–7].

Для обеспечения безопасности строительных конструкций и людей при взрыве мощных самодельных взрывных устройств во время проведения массовых мероприятий предложено использовать быстровозводимое временное взрывозащитное сооружение (ВЗС), состоящее из трех одиночных металлических каркасов с открытым верхом, скрепленных между собой сваркой (или болтами) и обшитых металлопрофилем. Внутри каждого каркаса вставлены емкости из водонепроницаемой ткани, заполняемые водой.

Для оценки работоспособности ВЗС рассматривается взрыв заряда ВВ массой 100 кг в тротиловом эквиваленте (ТЭ), находящегося в легковом автомобиле на расстоянии 2,5 м от ВЗС, которое заполнено водой до уровня $H = 2,2$ м. Внешний вид ВЗС до взрыва, в момент взрыва и после взрыва приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид ВЗС до взрыва, в момент взрыва и после взрыва

Координаты расположения датчиков для записи временных зависимостей давления, а также места установки датчиков (указаны стрелками синего цвета) показаны на рис. 2.

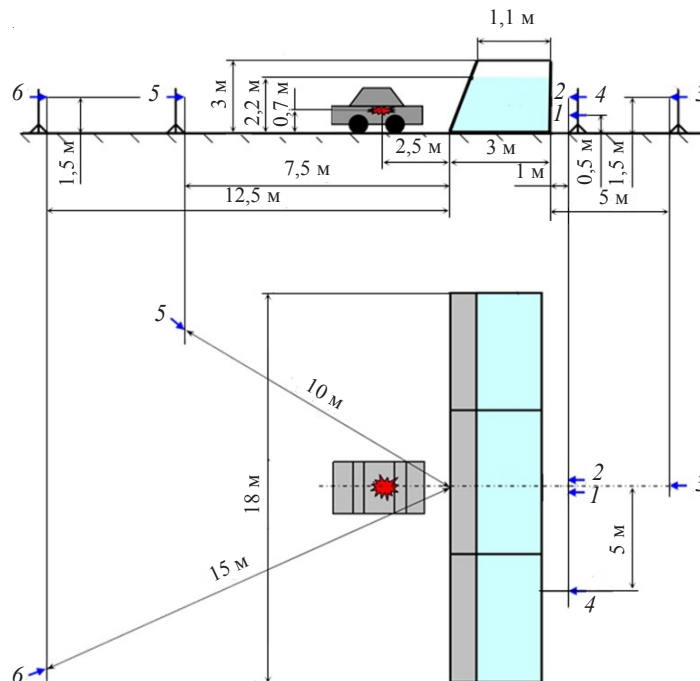


Рис. 2. Схема расположения датчиков давления

Численное моделирование процесса взрыва и его воздействие на ВЗС проведено в гидродинамической постановке. При этом ВЗС, заполненное водой, до начала разрушения конструкции (~ 50 мс) рассматривалось как жесткое недеформируемое тело.

Начальная стадия газодинамического расчета взрыва заряда ВВ проведена по двумерной программе ДИАДА-2D, основанной на методе С.К. Годунова [8], предназначенной для решения уравнений газовой динамики в осесимметричной или плоской геометрии на подвижных эйлеровых сетках [9]. Метод позволяет адаптировать разностную сетку к особенностям геометрии задачи, выделять в качестве счетных границ разрывы в виде контактных границ, ударных и детонационных волн.

Трехмерная стадия распространения и взаимодействия ВУВ с преградой проведена в трехмерном комплексе программ ЛОГОС [10–15]. Начальное состояние трехмерного расчета было получено путем интерполяции результатов двумерного расчета на трехмерную счетную сетку комплекса ЛОГОС, который предназначен для решения связанных и сопряженных задач тепломассопереноса и гидродинамики на параллельных ЭВМ с десятками тысяч расчетных ядер.

Для измерения параметров ВУВ при проведении натурных испытаний ВЗС использовались пьезоэлектрические датчики давления СПК с чувствительностью от 0,03 до 0,3 пКл/Па [16], внешний вид которых показан на рис. 3. Датчики располагались попарно в контрольных точках 1–6 (см. рис. 2).

Измерение параметров ВУВ датчиками СПК осуществлялось по аттестованной и зарегистрированной в Госреестре методике «СВР20-ВУВ» [17], обеспечивающей измерение амплитуды давлений с погрешностью не более $\pm 11\%$.



Рис. 3. Датчики СПК с диаметрами чувствительного элемента 5, 10, 15 и 32 мм

1. Результаты численного моделирования распространения ВУВ

Для трехмерного расчета распространения ВУВ построена сетка, содержащая 100 млн ячеек и состоящая преимущественно из шестигранников с ребром ячейки не более 3 см.

Начальное состояние расчетной области: плотность $\rho = 1,3 \text{ кг/м}^3$, энергия $E = 192300 \text{ Дж/кг}$, компоненты скорости $U=0$, $V=0$, $W=0$, давление $P = 1,01325 \text{ атм}$. На трехмерной сетке выполнена интерполяция результатов предварительных расчетов решения двумерной задачи на момент времени $t = 47 \text{ мкс}$.

На рис. 4 показаны поля давлений для двумерной задачи в этот момент времени и начальное поле для трехмерной задачи.

На границах расчетной области заданы следующие граничные условия: плоскость симметрии (вертикальная передняя граница), жесткая стенка с проскальзыванием (горизонтальная нижняя граница и контур ВЗС) и свободный выход (на остальной границе).

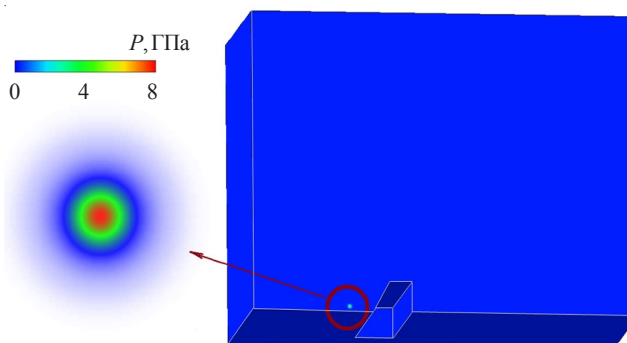


Рис. 4. Поле давления в двумерном (слева) и трехмерном (справа) случаях

Трехмерные расчеты проведены с использованием комплекса программ ЛОГОС [10–15] по схеме С.К. Годунова без выделения особенностей течения. Для расчета процессов в продуктах взрыва и воздухе использовалось уравнение состояния гомогенной смеси продуктов взрыва и идеального газа с учетом их концентраций в каждой ячейке [18].

Рисунок 5 иллюстрирует полученное при трехмерном расчете поле давлений в различные моменты времени.

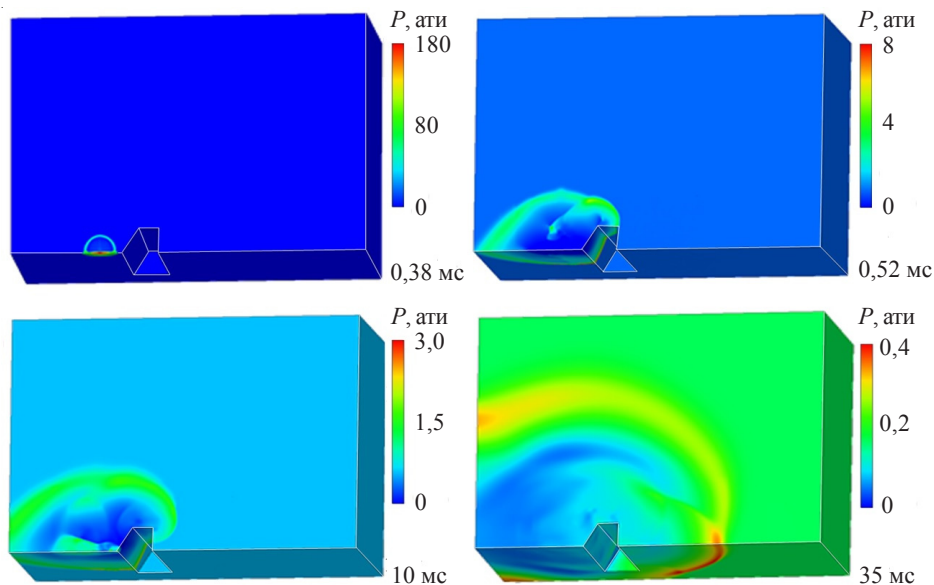


Рис. 5. Расчетное поле давления в различные моменты времени

2. Обсуждение результатов численного моделирования и натуральных испытаний взрывозащитного сооружения

Общий вид рабочего поля до испытания, в момент испытания и после проведения испытания ВЗС показан на рис. 1. Видно, что полностью разрушена средняя секция ВЗС, а у двух других повреждены только верхние части.

Зависимости давления P от времени t в ВУВ, полученные в контрольных точках 1–6 (см. рис. 2) при проведении натуральных испытаний ВЗС и численного моделирования, приведены на рис. 6. Положение контрольных точек различается расстоянием s от границы основания ВЗС, высотой h от уровня земли и расстоянием a от плоскости, проходящей через центр заряда ВВ и перпендикулярной задней стенке ВЗС.

На рис. 7 представлено распределение давления перед и за ВЗС в плоскости симметрии, показывающее удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных по пиковому значению давления без ВЗС с формулой Садовского для наземного взрыва (на дистанциях более $12R_0$, где $R_0 = 0,5$ м – радиус заряда) [19, 20].

Следует отметить, что присутствие ВЗС приводит к понижению давления более чем в 10 раз, но с определенного расстояния (~ 12 м от центра взрыва) давление за ВЗС изменяется незначительно. Если же ВЗС расположить на расстоянии 8 м от центра взрыва (рис. 8), то давление за ВЗС снизится еще в ~ 2 раза.

Сравнение расчетных параметров ВУВ с экспериментом и анализ результатов осмотра рабочего поля после испытаний ВЗС показывает, что:

- времена прихода ВУВ и максимальные давления на фронте ВУВ в контрольных точках, полученные расчетом и экспериментально, совпадают в пределах погрешности измерений;

- ВЗС, наполненное водой до уровня $H = 2,2$ м и обшитое листами металлопрофиля, при взрыве заряда ВВ массой 100 кг ТЭ, расположенного в легковом автомобиле в 2,5 м от ВЗС, позволяет снизить давление в ВУВ до 0,53 ати на расстоянии

1 м за ВЗС по сравнению с давлением 8,1 ати, рассчитанным для этой же точки без ВЗС по формуле Садовского. При удалении центра взрыва от ВЗС до 8 м давление в ВУВ в этой точке уменьшится до 0,35 ати;

– все фрагменты разрушенного автомобиля остановлены центральной секцией ВЗС. При этом крупные фрагменты автомобиля разбросаны перед ВЗС на расстоянии не более 30 м, а мелкие фрагменты кузова, покрышек и водонепроницаемой ткани от ВЗС – на расстоянии не более 110 м.

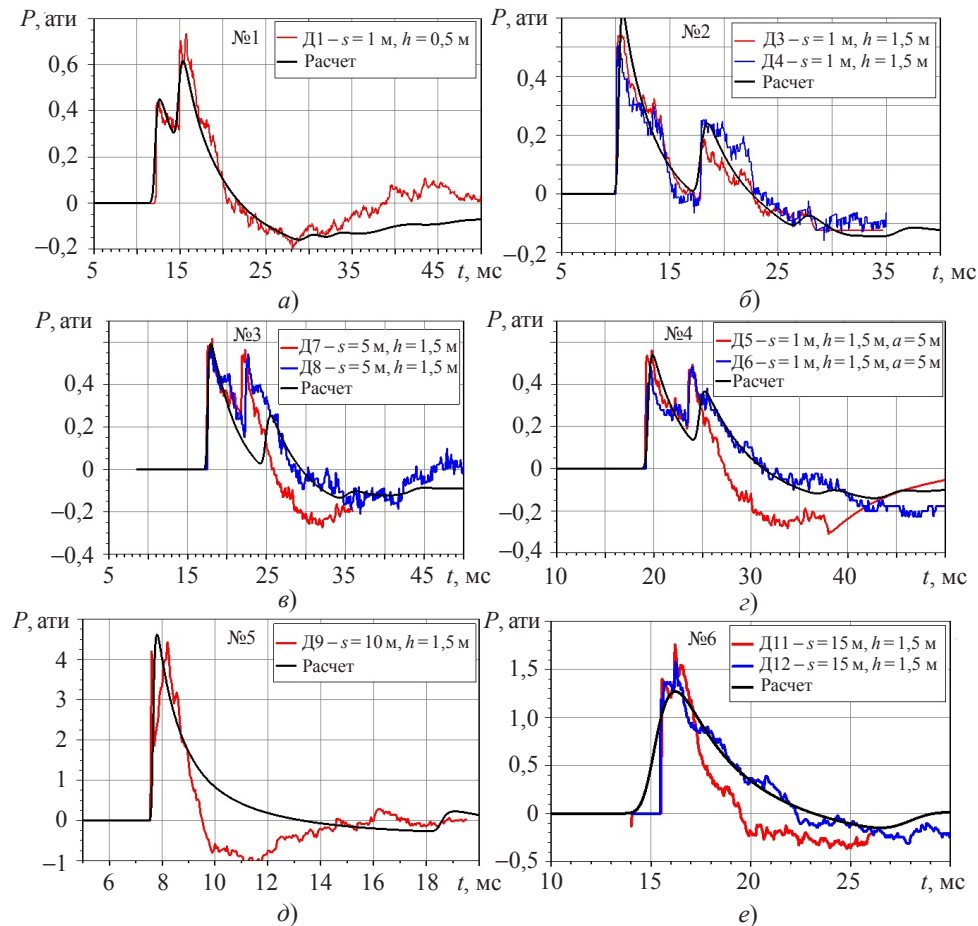


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные данные по давлению, создаваемому ВУВ, в контрольных точках 1–6

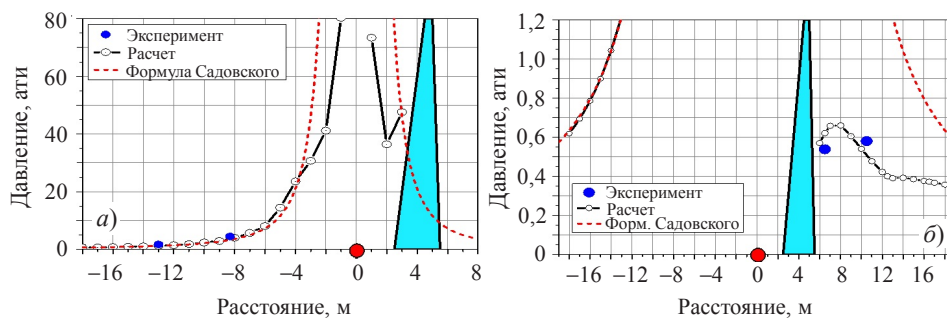


Рис. 7. Расчетные давления перед и за ВЗС в плоскости симметрии

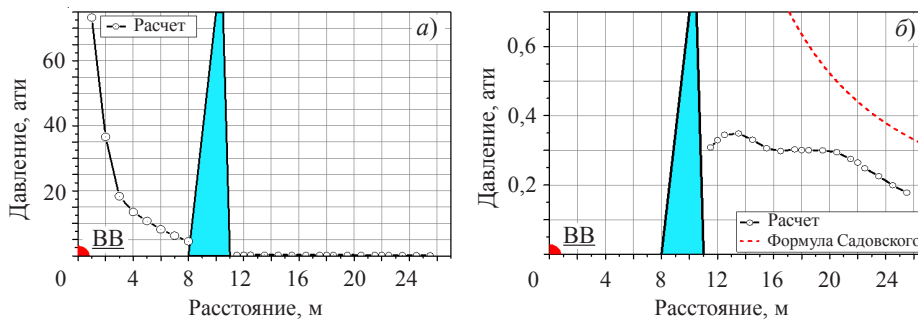


Рис. 8. Расчетный прогноз уровня давлений перед и за ВЗС в плоскости симметрии при увеличенной дистанции от центра взрыва ВВ до ВЗС

С целью выбора наиболее эффективного расположения ВЗС относительно возможного места взрыва и его оптимальной геометрии проведен ряд трехмерных расчетов с вариацией расстояния от центра взрыва ВВ до основания ВЗС (начиная с 2,5 м) и геометрии контура ВЗС. Ключевым результирующим параметром было избыточное давление за ВЗС на высоте 1,5 м на расстояниях 1 м и 5 м (контрольные точки 2 и 3 на рис. 2).

Результаты расчетов представлены на рис. 9. Для ВЗС высотой $H = 3$ м, полностью заполненного водой, максимальная величина давления на высоте 1,5 м в точке, расположенной на расстоянии 1 м за ВЗС, с увеличением дистанции между центром взрыва ВВ и ВЗС уменьшается линейно, начиная с 0,53 ати, с градиентом $\approx -0,033$ ати/м.

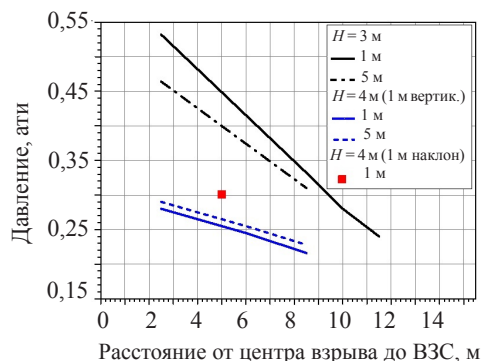


Рис. 9. Расчетные зависимости давления за ВЗС в зависимости от дистанции между центром взрыва и ВЗС

Для анализа влияния высоты ВЗС на изменение давления за ВЗС рассматривались также варианты увеличения высоты сооружения до $H = 4$ м двумя способами (см. рис. 10):

- с сохранением трапецевидной формы ВЗС (наклонная надстройка);
- с прямоугольной надстройкой (вертикальная надстройка).

По результатам расчетов (см. рис. 9) прямоугольная форма надстройки оказалась на $\approx 15\%$ более эффективной по сравнению с трапецевидной формой. При этом давление уменьшалось, начиная с 0,28 ати, с градиентом $\approx -0,01$ ати/м.

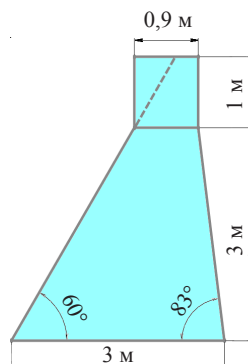


Рис. 10. Варианты надстройки ВЗС: вертикальная и наклонная

Заключение

По результатам натурных испытаний быстровозводимого ВЗС и численного моделирования распространения ВУВ при взрыве 100 кг ТЭ в легковом автомобиле можно сделать следующие выводы:

1) при расположении центра заряда ВВ на расстоянии 2,5 м от ВЗС трапециевидной формы высотой 3 м, заполненного водой до уровня 2,2 м, амплитуда ВУВ за ВЗС на расстоянии от него 1 м и высоте 1,5 м снижается до 0,54 ати по сравнению с давлением 8,1 ати, рассчитанным для этой же точки без ВЗС;

2) при расположении центра заряда ВВ на расстоянии 2,5 м от ВЗС трапециевидной формы высотой 3 м, полностью заполненного водой, обеспечивается снижение амплитуды ВУВ за ВЗС на расстоянии от него 1 м на высоте 1,5 м до 0,53 ати, а при увеличении расстояния центра взрыва от ВЗС до 8 м амплитуда ВУВ уменьшается до 0,35 ати;

3) при расположении центра заряда ВВ на расстоянии 2,5 м от ВЗС трапециевидной формы с прямоугольной формой надстройки общей высотой 4 м, полностью заполненного водой, обеспечивается снижение амплитуды ВУВ за ВЗС на расстоянии от него 1 м на высоте 1,5 м до 0,28 ати, а при отнесении центра взрыва от ВЗС на 8 м амплитуда ВУВ уменьшается до 0,22 ати. При этом прямоугольная форма надстройки на $\approx 15\%$ более эффективна по сравнению с трапециевидной;

4) при взрыве 100 кг ТЭ в легковом автомобиле на расстоянии 2,5 м от быстровозводимого ВЗС все крупные фрагменты разрушенного автомобиля локализованы центральной секцией ВЗС, а мелкие фрагменты кузова автомобиля, не представляющие опасности для людей, обнаружены на расстояниях не более 110 м.

Список литературы

1. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П. и др. *Взрывные явления. Оценка и последствия*. Т. 2. М.: Мир, 1986. 319 с.
2. *Единые правила безопасности при взрывных работах*. Под ред. М.П. Васильчука и др. ПБ 13-407-01. 2002. 212 с.
3. Корнев Б.Г. *Динамический расчет сооружений на специальные воздействия*. М.: Стройиздат, 1981. 218 с.
4. Расторгуев Б.С., Плотников А.И., Хуснутдинов Д.З. *Проектирование зданий и сооружений при аварийных взрывных воздействиях*. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. 152 с.

5. Zhou X.Q., Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *International Journal of Impact Engineering*. 2008. Vol. 35. Iss. 5. P. 363–375.
6. Larcher M., Casadei F. Explosions in complex geometries – a comparison of several approaches. *International Journal of Protective Structures*. 2010. Vol. 1. No 2. P. 169–196.
7. Karlos V., Solomos G. *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. 58 p.
8. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Прокопов Г.П. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. М.: Наука, 1976. 407 с.
9. Величко О.М., Губкова Г.Н., Дудырева Г.П. и др. Пакеты программ для решения многомерных задач газовой динамики разностным методом Годунова. *Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Матер. конф.* Саров, 2000. С. 21–29.
10. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС для расчета задач гидродинамики и теплопереноса на суперЭВМ. Базовые технологии и алгоритмы. *Супервычисления и математическое моделирование: Сб. тр. XII Международ. семинара*. 11–5 окт. 2010. Саров, 2011. С. 215.
11. Козелков А.С., Дерюгин Ю.Н., Зеленский Д.К. и др. *Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчета задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса*. Препринт №111. Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2013. 67 с.
12. Погосян М.А., Савельевских Е.П., Шагалиев Р.М. и др. Применение отечественных суперкомпьютерных технологий для создания перспективных образцов авиационной техники. *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2013. Вып. 2. С. 3–18.
13. Веселова Е.А., Дерюгин Ю.Н., Жалнин Р.В. и др. Пакет программ ЛОГОС. Методика повышенного порядка точности на блочно-структурированных сетках с использованием реконструкции типа WENO. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. №6. URL: www.science-education.ru/106-7329.
14. Betelin V.B., Shagaliev R.M., Aksenov S.V. et al. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code. *Acta Astronautica*. 2014. Vol. 96. P. 53–64.
15. Веселова Е.А., Жалнин Р.В., Дерюгин Ю.Н. и др. Пакет программ ЛОГОС. Методика расчета течения вязкого сжимаемого газа на блочно-структурированных сетках. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. №2. URL: www.science-education.ru/116-12601.
16. Вишневецкий Е.Д., Жиембетов А.К., Лобастов С.А. и др. *Пьезоэлектрический датчик воздушных ударных волн*. Патент РФ на полезную модель G01L23/10.
17. Базаров Ю.Б., Лобастов С.А. и др. *Методика измерения параметров импульсных давлений датчиками СПК и регистраторами СВР20 (СВР20-ВУВ)*. Свидетельство об аттестации № 3003/0017М-(РА.RU311769-2016)-2016, РФЯЦ – ВНИИЭФ. Саров, 2016.
18. Куропатенко В.Ф. Уравнения состояния продуктов взрыва детонации конденсированных взрывчатых веществ. *Численные методы механики сплошных сред*. 1977. Т. 8. №6. С. 68–71.
19. Покровский Г.И. *Взрыв*. М.: Недра, 1980. 190 с.
20. *Физика взрыва*. Под ред. Л.П. Орленко. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. 832 с.

References

1. Baker W.E., Cox P.A., Westine P.S. et al. *Explosive Hazards and Evaluation*. Amsterdam. Oxford. New York. Elsevier Scientific Publishing Company. 1983. 840 p.
2. *Edinye pravila bezopasnosti pri vzryvnykh rabotakh [Uniform Safety Requirements for Blasting Operations]*. Eds: Vasilchuk M.P. et al. PB 13-407-01. 2002. 212 p. (In Russian).
3. Korenev B.G. *Dinamicheskii raschet sooruzheniy na spetsialnye vozdeystviya [Dynamic Calculation of Structures for Special Effects]*. Moscow. Stroizdat Publ. 1981. 218 p. (In Russian).
4. Rastorguev B.S., Plotnikov A.I., Khusnutdinov D.Z. *Proektirovanie zdaniy i sooruzheniy pri avariynnykh vzryvnykh vozdeystviyakh [Designing of Buildings and Structures during Emergency Explosive Effects]*. Moscow. Association of the Building universities Publ. 2007. 152 p. (In Russian).

5. Zhou X.Q., Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. *Int. J. Impact. Eng.* 2008. Vol. 35. No 5. P. 363–375.
6. Larcher M., Casadei F. Explosions in complex geometries - a comparison of several approaches. *International Journal of Protective Structures.* 2010. Vol. 1. No 2. P. 169–196.
7. Karlos V., Solomos G. *Calculation of Blast Loads for Application to Structural Components.* Luxembourg. Publications Office of the European Union. 2013. 58 p.
8. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ia., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical Solution of Multidimensional Gas Dynamics Problems]. Moscow. Nauka Publ. 1976. 407 p. (In Russian).
9. Velichko O.M., Gubkova G.N., Dudyreva G.P. et al. Pakety programm dlya resheniya mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki raznostnym metodom Godunova [Software packages for solving multidimensional problems of gas dynamics by the Godunov difference method]. *Conference Materials: Modern Methods of Designing and Developing Missile and Artillery Weapons.* Sarov. 2000. P. 21–29 (In Russian).
10. Kozelkov A.S., Deriugin Yu.N., Zelenskii D.K. et al. Mnogofunktsionalnyy paket programm LOGOS dlya rascheta zadach gidrodinamiki i teplomassoperenosa na superEVM. Bazovye tekhnologii i algoritmy [Multi-functional software package LOGOS for the calculation of problems of hydrodynamics and heat and mass transfer on a supercomputer. Basic technologies and algorithms] *Collection of works of the XII International Seminar "Supercomputation and Mathematical Modeling"*. Oct. 11–5. 2010. Sarov. 2011. P. 215 (In Russian).
11. Kozelkov A.S., Deriugin Yu.N., Zelenskii D.K. et al. *Mnogofunktsionalnyy paket programm LOGOS: fiziko-matematicheskie modeli rascheta zadach aero-, gidrodinamiki i teplomassoperenosa* [Multi-functional Software Package LOGOS: Physical and Mathematical Models for Calculating the Problems of Aero, Hydrodynamics and Heat and Mass Transfer]. Preprint No 111. Sarov. RFNC–VNIIEF. 2013. No 111. P. 67 (In Russian).
12. Pogosian M.A., Savelievskikh E.P., Shagaliev R.M. et al. Primenenie otechestvennykh superkompyuternykh tekhnologiy dlya sozdaniya perspektivnykh obraztsov aviatcionnoy tekhniki [Application of Russian supercomputer technologies to develop the advanced models of aviation technology]. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki (VANT). Seriya Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov* [Problems of Atomic Science and Technology. Series Mathematical Modeling of Physical Processes]. 2013. No 2. P. 3–18 (In Russian).
13. Veselova E.A., Deryugin Yu.N., Zhalnin R.V. et al. Paket programm LOGOS. Metodika povyshennogo poriyadka tochnosti na blochno-strukturirovannykh setkakh s ispol'zovaniem rekonstrutsii tipa WENO [LOGOS software package. Methods of higher order of accuracy on block-structured grids using WENO-type reconstruction]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012. No 6. URL: www.science-education.ru/106-7329 (In Russian).
14. Betelin V.B., Shagaliev R.M., Aksenov S.V. et al. Mathematical simulation of hydrogen-oxygen combustion in rocket engines using LOGOS code. *Acta Astronautica.* 2014. Vol. 96. P. 53–64.
15. Veselova E.A., Zhalnin R.V., Deryugin Yu.N. et al. Paket programm LOGOS. Metodiki rascheta techeniya vyazkogo szhimaemogo gaza na blochno-strukturirovannykh setkakh [LOGOS software package. Methods for calculating viscous compressible gas flow on block-structured grids]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2014. No 2. URL: www.science-education.ru/116-12601 (In Russian).
16. Vishnevetskii E.D., Zhiembetov A.K., Lobastov S.A. et al. *Pyezoelektricheskiy datchik vozdushnykh udarnykh voln* [Air Shock Wave Piezoelectric Sensor]. Patent RF na poleznuyu model G01L23/10. [Patent of the Russian Federation for Utility Model G01L23/10] (In Russian).
17. Bazarov Yu., B., Lobastov C.A. et al. *Metodika izmereniya parametrov impulsnykh davleniy datchikami SPK i registratorami SVR20 (SVR20-VUV)* [The Method of Measuring the Parameters of the Pulse Pressure Sensors SPC and Recorders SVR20 (SVR20-VUV)]. Certificate of attestation No 3003/0017M-(RA.RU311769-2016)-2016, VNIIEF–RFNC. Sarov. 2016 (In Russian).
18. Kuropatenko V.F. Uravneniya sostoyaniya produktov vzryva detonatsii kondensirovannykh vzryvchatykh veshchestv [Equations of state for explosion products of detonation of condensed explosives]. *Chislennyye metody mekhaniki sploshnykh sred* [Numerical Methods of Continuum Mechanics]. 1977. Vol. 8. No 6. P. 68–71 (In Russian).

19. Pokrovskii G.I. *Vzryv [Explosion]*. Moscow. Nedra Publ. 1980. 190 p. (In Russian).
20. *Fizika vzryva [Explosion Physics]*. Ed. L.P. Orlenko. Vol. 1. Moscow. Fizmatlit Publ. 2002. 832 p. (In Russian).

A RAPIDLY ERECTED TEMPORARY STRUCTURE PROTECTING FROM POWERFUL EXPLOSIONS

**Abakumov A.I.¹, Bazarov Yu.B.¹, Veselova E.A.¹, Vyalykh A.M.¹,
Gubachev A.V.¹, Lobastov S.A.¹, Safronov I.I.¹,
Smirnov A.S.¹, Tsyarkin V.I.²**

¹*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

²*Scientific-Production Enterprise “Ecotest Ltd” , Sarov, Russian Federation*

A design of a rapidly erected temporary structure reducing adverse factors of a powerful explosion to the levels safe both for people and building structures is proposed. The protective structure consists of three separate metal frames with the open upper part, welded or bolted to each other and covered with metal profile. Each frame houses reservoirs of watertight cloth filled with water. Damping of an air shockwave has been numerically modeled, and a full-scale rapidly erected temporary protective structure has been tested with an explosion of a home-made 100kg-trotil equivalent explosive device installed in a car.

The explosion process and its impact on the protective structure were numerically modeled in a hydrodynamic formulation, where the structure prior to the beginning of failure was regarded as a rigid non-deformable body. According to the computational results, a rectangular geometry of the frame is more effective than a trapezoidal one.

The parameters of the air shockwave were measured with SPK-sensors according to the certified and registered in the State Register methodology “SVP20-VUV” providing measurement of pressure amplitudes to the accuracy of not more than ± 11 %.

The numerical results are compared with the results of tests of the proposed design of a protective structure. The numerical and experimental data on the peak value of pressure without the protective structure satisfactorily agree Sadovskiy's formula for a ground explosion. Times of arrival of the air shockwave and maximal pressures along its front in the control points in front of and behind the protective structure obtained numerically and experimentally agree within measuring accuracy.

Keywords: blast-prove structure, adverse factors of explosion, shockwave, structural elements of a blast-prove structure, localization of debris, numerical modeling, comparison of numerical and experimental data.