

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 1. С. 88–98
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(1):88-98

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.042

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98>

Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей

Максим Александрович Липленко✉, Александр Николаевич Бороденко,
Георгий Владимирович Мосолов

Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. При проектировании зданий и сооружений на опасных производственных объектах перед инженером стоит важная задача — определить нагрузки при внешних взрывах топливно-воздушных смесей. В настоящее время в практике проектирования для оценки различных воздействий на строительные конструкции широко применяются программные комплексы, использующие подход вычислительной гидрогазодинамики (CFD). В связи с этим необходимо разработать подход к расчету нагрузок методами численного моделирования и выполнить его оценку, сравнив его с экспериментальными данными.

Цели и задачи. Целью настоящей работы является разработка подхода к определению нагрузок от внешнего детонационного взрыва топливно-воздушной смеси на здания и сооружения различной конфигурации при помощи методов вычислительной гидрогазодинамики.

Основная часть. Рассмотрен подход к определению нагрузок на строительные конструкции зданий и сооружений при внешних детонационных взрывах ТВС на основании метода «сжатого баллона». Предложены зависимости для задания исходных данных при выполнении численных расчетов с помощью компьютерных программ, использующих подход вычислительной гидрогазодинамики — CFD. Выполнено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent различных экспериментов. Для оценки точности метода «сжатого баллона» применительно к расчету внешнего детонационного взрыва проведено сравнение результатов численного моделирования и инженерных нормативных методик с различными экспериментами.

Выводы. Проведенное численное моделирование распространения взрывной волны при различных условиях показало качественное и количественное совпадение с рассматриваемыми экспериментами. Рассмотренный расчетный метод позволяет достаточно точно реализовать профиль давления на любую поверхность здания или сооружения при внешнем детонационном взрыве ТВС и оценить несущую способность строительных конструкций. Предложенный подход к расчету нагрузок при внешнем детонационном взрыве ТВС может применяться при проектировании зданий или сооружений различной конфигурации.

Ключевые слова: численное моделирование; взрывная нагрузка; взрывная волна; взрыв облака; взрыв газа; вычислительная гидрогазодинамика

Для цитирования: Липленко М.А., Бороденко А.Н., Мосолов Г.В. Определение нагрузок на здания и сооружения при внешних взрывах топливно-воздушных смесей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2022. Т. 31. № 1. С. 88–98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98

✉ Липленко Максим Александрович, e-mail: Liplenko@gmail.com

The calculation of loads on buildings and structures caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture

Maxim A. Liplenko✉, Alexandr N. Borodenko, Georgiy V. Mosolov

Pipeline Transport Institute, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An important engineering task, to be solved in the process of designing buildings and structures for hazardous industrial facilities, is to determine values of loads caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture. Nowadays software packages, that use the computational fluid dynamics (CFD) approach, are widely applied in the design practice to assess various effects on building structures. In this regard, it is necessary to develop a load calculation method, that employs numerical simulation, and verify it in comparison with the experimental data.

Goals and objectives. The purpose of this work is to use the method of computational fluid dynamics to analyze external sympathetic detonation loads on various types of buildings and structures.

The body of the article. The article addresses the “compressed balloon” method used to analyze loads, caused by outdoor explosions of gas. Dependencies, proposed in the article, are needed to set the input data and make numerical calculations using the computational fluid dynamics (CFD) technique. The numerical modeling of various experiments in the ANSYS Fluent software package was conducted. The authors compared the results of numerical modeling and standard engineering methods with various experiments to assess the accuracy of the “compressed balloon” method used to analyze an outdoor detonation explosion.

Conclusions. The authors have proven the qualitative and quantitative convergence of the numerical model of blast wave propagation and the experimental data. This calculation method allows to accurately apply the pressure profile to any surface of a building or structure in the course of an outdoor detonation explosion and estimate the bearing capacity of building structures. The proposed method can be used in the design of buildings or structures that feature various configurations.

Keywords: numerical simulation; blast loading; blast wave; cloud explosion; gas explosion; computational fluid dynamics (CFD)

For citation: Liplenko M.A., Borodenko A.N., Mosolov G.V. The calculation of loads on buildings and structures caused by outdoor explosions of the fuel-air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(1):88-98. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.01.88-98 (rus).

✉ Maxim Alexandrovich Liplenko, e-mail: Liplenko@gmail.com

Введение

Проектирование строительных конструкций зданий и сооружений топливно-энергетического сектора связано с необходимостью учета нагрузок от взрывов топливно-воздушных смесей (ТВС). Как известно, взрывы ТВС разделяют на два режима взрывного превращения: детонацию и дефлаграцию [1, 2]. В настоящей работе рассматривается определение нагрузок при детонационном взрыве ТВС.

Взаимодействие взрывной волны с преградой (зданием или сооружением) зависит от типа взрывного превращения: детонация или дефлаграция [1]. В отечественных нормативных документах, применяемых при проектировании: РБ Г-05-039-96¹, РБ НТЦ ПБ², СП 296.1325800.2017³, отсутствует полная методика расчета динамических нагрузок на различные поверхности здания или сооружения (боковые стены, кровля, тыльная стена и т.д.). Только в методике СП 296.1325800.2017 предложены соотношения для расчета параметров нагрузок при детонационном и дефлаграционном взрывах на поверхности отдельно стоящего здания прямоугольной конфигурации при воздействии ударной волны (УВ). Методика СП 296.1325800.2017 основана на консервативном подходе к определению нагрузок на здания. В ней рассматриваются взрывы конденсированных ВВ. Более

детально она представлена в нормах США⁴. В случае зданий сложных конфигураций или влияния окружающей застройки выполнить расчеты на нагрузки от взрывов ТВС не представляется возможным.

Таким образом, перед проектировщиком стоит вполне актуальная задача получения обоснованных схем нагрузок от внешнего взрыва на строительные конструкции зданий различной конфигурации, а также разработка алгоритма определения нагрузок от внешнего взрыва на строительные конструкции при проектировании.

Программные комплексы численного моделирования

Для более точной оценки, по сравнению с нормативными методами расчета последствий аварийных взрывов, используют подход вычислительной гидрогазодинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics). С помощью данного метода возможно выполнить расчет нагрузок от взрыва на здания и сооружения различной конфигурации, а также отдельные элементы конструкций [3–6]. Программное обеспечение, основанное на подходе CFD, учитывает эффекты, связанные с взаимодействием взрывной волны с преградами, геометрию застройки, расстояние между источником взрыва и конструкцией и т.д.

Численные методы исследования гидрогазодинамики включают совокупность физических, химических и математических процессов. На сегодняшний день существует достаточно большое количество компьютерных кодов в области вычислительной гидрогазодинамики [4–16], среди которых можно выделить две группы:

¹ РБ Г-05-039-96. Руководство по безопасности. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. М. : НТЦ АРБ Госатомнадзора России. 2000.

² Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». М. : ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности». 2015. 44 с.

³ СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия. М. : Стандартинформ. 2017. 65 с.

⁴ UFC 3-340-02. Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Department of Defense, Washington, DC. 2008.

- *Первая группа.* Программные продукты общего назначения, применяемые практически во всех отраслях: космонавтике, авиации, строительстве и архитектуре, судостроении, медицине и т.д. К ним относятся такие коммерческие программные продукты: ANSYS CFD (Fluent и CFX), STAR-CD, FLOWVISION, ЛОГОС, LS-DYNA и т.д., а также некоммерческий продукт с открытым исходным кодом: OpenFOAM.
- *Вторая группа.* Программные продукты специализированного назначения, применяемые в сфере промышленной безопасности [4, 10, 11]. К ним относятся такие коммерческие коды, как: Autoreagas, Flacs GexCon, PHAST, ExploCFD7, COM3D Code и т.д., а также некоммерческий продукт с открытым исходным кодом: BlastFoam от Synthetik Technologies.

Первая группа программных комплексов (ПК) прежде всего характеризуется большими возможностями, поскольку этого требует спектр решаемых задач гидрогазодинамики различных отраслей. Основными плюсами ПК первой группы являются: различные математические модели горения и турбулентности, позволяющие решать широкий круг задач, высокая точность реализованных алгоритмов.

Применение ПК первой группы в решении практических задач промышленной безопасности, связанных со взрывами ТВС, прежде всего сдерживается главным образом из-за высоких требований к вычислительным ресурсам (многопроцессорные станции с большими объемами оперативной и дисковой памяти).

Для решения вопроса, связанного с высокими требованиями к вычислительным ресурсам, применяют специализированные ПК вычислительной гидрогазодинамики (вторая группа). В них используются наиболее простые с вычислительной точки зрения модели турбулентности и горения. На сегодняшний день разработаны алгоритмы, позволяющие упростить геометрию объектов в расчетной модели для экономии вычислительных ресурсов. Применение специализированных ПК при решении задач со взрывами ТВС позволяет сэкономить время расчета от нескольких суток до нескольких часов.

Метод «сжатого баллона»

В практике расчета нагрузок от взрыва на здания и сооружения нашел широкое применение сравнительно простой метод «сжатого баллона», не требующий больших вычислительных ресурсов. Следует отметить, что применяется он во многих ПК, причем как из первой группы, так и из второй. Метод «сжатого баллона» хорошо подходит для моделирования воздействия взрывной волны на здания и сооружения

при детонационном взрыве, т.е. моделирует воздушную ударную волну (ВУВ).

Метод «сжатого баллона» — феноменологическая модель. Функция «давление-время», полученная в результате сжатия баллона, может приблизительно соответствовать кривой давления ВУВ. Величину сжатия можно откалибровать по максимальному давлению или импульсу.

Идея метода «баллона» заключается в использовании области (баллона) со сжатым воздухом начального размера, давление и температура в этой области значительно превышают начальные, которые назначены на окружающее пространство.

Применительно к моделированию внешнего взрыва ТВС в расчете принимается, что облако имеет форму полусферы. Для расчета основных исходных данных: давления и температуры в области баллона, воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Рассчитываем начальный объем облака ТВС по следующей формуле:

$$V_{bal} = \frac{V_m \chi M_T T}{\mu C_{stx} T_0}, \quad (1)$$

где V_m — молярный объем газа;

χ — доля массы исходного топлива, переходящего в облако ТВС;

M_T — масса исходного топлива;

T — температура окружающей среды;

μ — молекулярная масса горючего;

C_{stx} — концентрация горючего в стехиометрической смеси;

$T_0 = 273,15$ К — температура.

2. Так как форма облака принята в виде полусферы, то ее радиус определяем по формуле:

$$R_0 = \sqrt[3]{\frac{3V_{TBC}}{2\pi}}. \quad (2)$$

3. Эффективный энергозапас горючей смеси при наземном взрыве определяем по формуле:

$$E_{ef} = 2\beta E_{spec} \chi M_T, \quad (3)$$

где β — корректировочный параметр для расчета энерговыделения в зависимости от вида горючего [1];

E_{spec} — теплота сгорания горючего газа, принимается $E_{spec} = 44$ МДж/кг [1].

4. Начальное избыточное давление в «баллоне» определяем по формуле Броуда [17]:

$$P_{bal} = \frac{E_{ef} (\gamma - 1)}{V_{bal}} + P_0, \quad (4)$$

где P_0 — атмосферное давление;

γ — показатель адиабаты.

5. Выполняем расчет коэффициента f_{bal} для того, чтобы распределить масштабный баланс на внутреннюю энергию и плотность газа в баллоне:

$$f_{bal} = \sqrt{\frac{P_{bal}}{P_0}}. \quad (5)$$

6. Выполняем расчет внутренней удельной энергии $e_{int, bal}$ и плотности газа баллона ρ_{bal} :

$$\rho_{bal} = \rho_0 f_{bal}, \quad (6)$$

$$e_{int} = e_{int, 0} f_{bal}. \quad (7)$$

7. Начальную температуру в «баллоне» определяем из уравнения состояния идеального газа:

$$T_{bal} = \frac{P_{bal} M_{air}}{R_G \rho_{bal}}, \quad (8)$$

где M_{air} — молярная масса (воздуха);

R_G — газовая постоянная, принимается $R_G = 8,314$ Дж/(моль·К).

Начальное давление в баллоне обычно получается из уравнения состояния идеального газа и представляет собой комбинацию более высокой внутренней энергии (температуры) и более высокой плотности газа баллона по сравнению с атмосферными значениями. Следовательно, при заданном давлении в воздушном баллоне только одна из этих двух величин независима, а другая является результатом уравнения состояния.

Описанная методика определения начального состояния «сжатого баллона» может использоваться в различных CFD программных продуктах. При необходимости исходные параметры «сжатого баллона» (давление P_{bal} и температура T_{bal}) могут быть откалиброваны, например, в соответствии с методикой,

разработанной М. Larcher и F. Casadei, описанной в [18].

Верификация

Для подтверждения предлагаемой методики были проведены расчеты по экспериментальным данным. Расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе выполнялось моделирование экспериментов, выполненных разными независимыми авторскими коллективами [19, 20]. На втором этапе выполнялось моделирование эксперимента, проведенного ООО «НИИ Транснефть» совместно с НИУ МГСУ.

Для сравнения выбирались эксперименты с наиболее полным описанием методик испытаний и исходных данных. Среди таких исследований можно выделить два эксперимента: М. Groethe [19] и Т. Nozu [20].

Эксперимент М. Groethe проведен авторским коллективом: М. Groethe, Е. Merilo, J. Colton, S. Chiba, Y. Sato, Н. Iwabuchi [19]. Для формирования облака ТВС использовалась полусфера объемом 300 м^3 . Полусфера состояла из каркаса (в виде геодезического купола) и тента — полиэтиленовой пленки. В эксперименте использовалась водородно-воздушная смесь стехиометрического состава. Инициирование облака производилось из центра на земле. Для инициирования детонации облака применялось ВВ С-4. Контрольная точка, для которой опубликован график изменения давления во времени, располагалась на уровне земли на расстоянии от центра $R = 15,61$ м.

Эксперимент Т. Nozu проведен в Японии авторским коллективом: Т. Nozu, R. Tanaka, T. Ogawa, K. Hibi, Y. Sakai [20]. Целью эксперимента было получение экспериментальных данных о параметрах взрыва ТВС и эффективности защитной стены, сни-

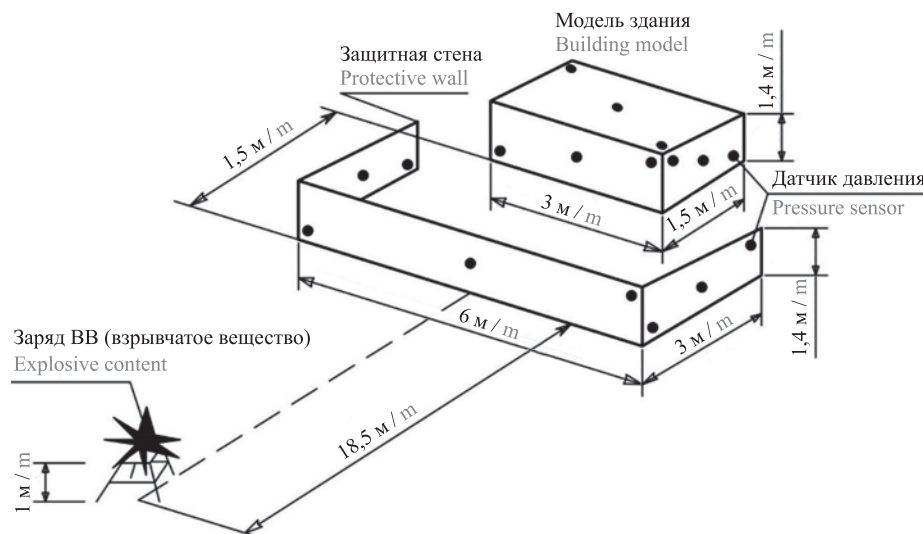


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

Fig. 1. Design of an experiment

жающей взрывные нагрузки. Для формирования облака ТВС использовался куб объемом $5,27 \text{ м}^3$ (размеры куба $\approx 2,24 \times 2,24 \times 1,05(h) \text{ м}$), который состоял из каркаса и тента — полиэтиленовой пленки. Защитная стена выполнялась из железобетона высотой 2 м, шириной 10 м и толщиной 0,15 м. Стена располагалась на расстоянии 4 м от передней грани куба ТВС. Для детонации инициирование проводилось с помощью ВВ С-4 массой 10 гр из центра куба на земле. При испытаниях измеряли давление на поверхности защитной стены и на земле, а также перемещения стены. В эксперименте использовалась водородно-воздушная смесь стехиометрического состава.

Испытания ООО «НИИ Транснефть» (далее эксперимент НИИ) проводились на специализированном

полигоне. Целью испытаний являлось определение нагрузок от детонационного взрыва на различные поверхности здания, закрытого от УВ защитной стеной. Схема проведения испытания показана на рис. 1. В эксперименте применялся безоболочечный заряд взрывчатого вещества (ВВ) в виде 50 патронов аммонита — 6ЖВ массой 0,2 кг каждый. Тротиловый эквивалент заряда составил 10 кг. Патроны были соединены вместе таким образом, чтобы заряд имел близкую к цилиндрической форму. Заряд располагался на высоте 1,0 м над поверхностью грунта. Обстреливаемая модель представляла собой модель здания прямоугольной формы ($1,5 \times 3,0 \times 1,4(h) \text{ м}$), которая располагалась за защитной стеной ($3,0 \times 6,0 \times 1,4(h) \text{ м}$) на расстоянии 1,5 м. Расстояние от заряда до передней грани защитной стены составляло 18,5 м.

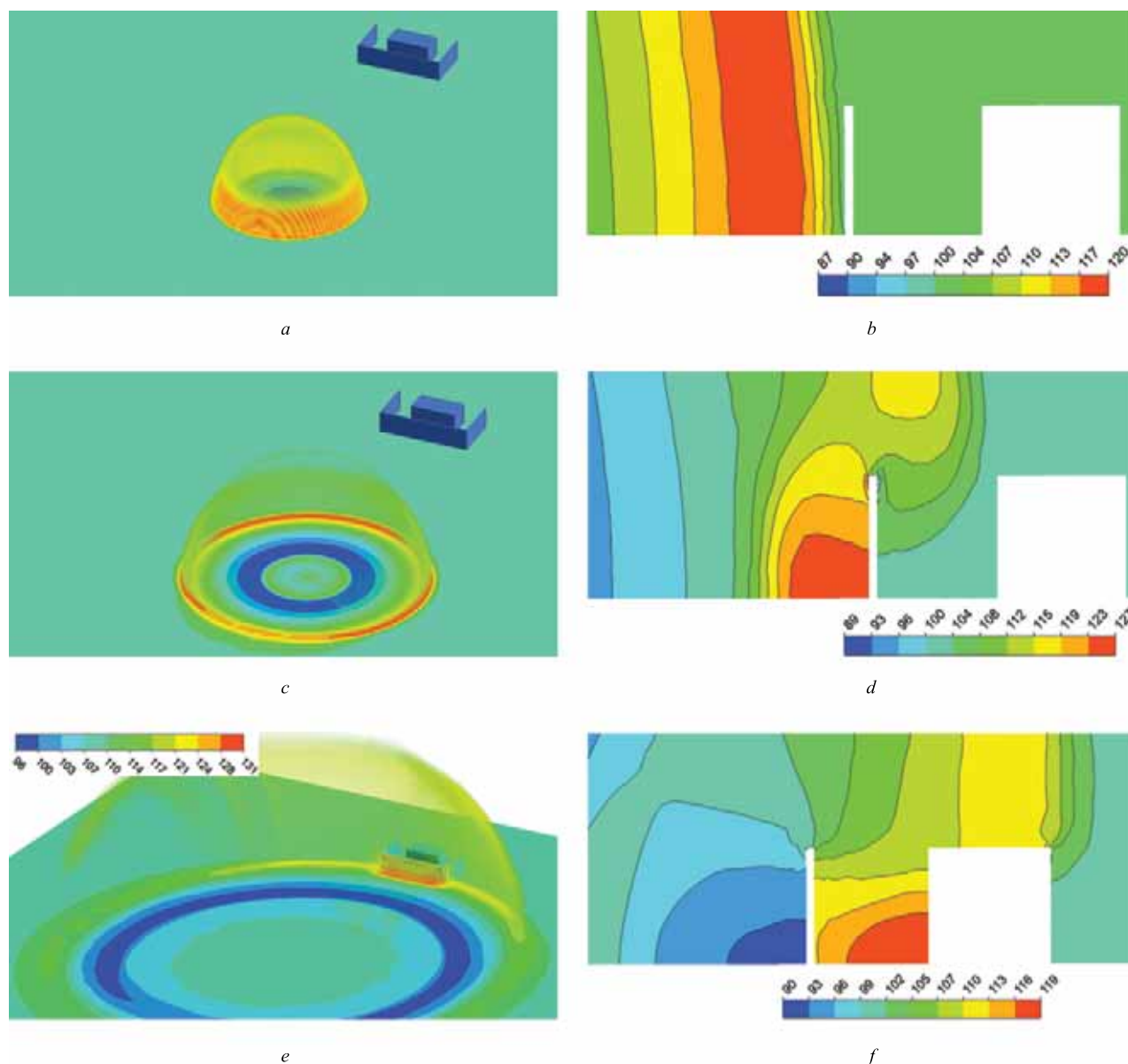


Рис. 2. Распределение давления (кПа): *a, c, e* — в объеме; *b, d, f* — в поперечном сечении модели

Fig. 2. Pressure distribution (kPa): *a, c, e* — volume-wise distribution; *b, d, f* — cross sectional distribution

Для измерения параметров УВ датчики давления, которые располагались на уровне грунта между зарядом ВВ и моделью на расстоянии 6 и 13 м, а также на гранях модели (см. рис. 1).

Результаты численного моделирования

Расчеты выполнялись в ПК Ansys Fluent в трехмерной нестационарной постановке задачи. Для решения систем уравнений в ANSYS Fluent использовался решатель Density-Based, схема AUSM. Математическое моделирование взрыва проводилось

с использованием стандартной модели турбулентности $k - \epsilon$.

На рис. 2 приведены поля избыточного максимального давления в различные моменты времени. На рис. 3 представлены графики динамического давления в характерных точках, полученные экспериментально и в результате численного моделирования.

Обсуждение

В отечественной нормативной базе можно выделить два принципиально отличающихся нормативных

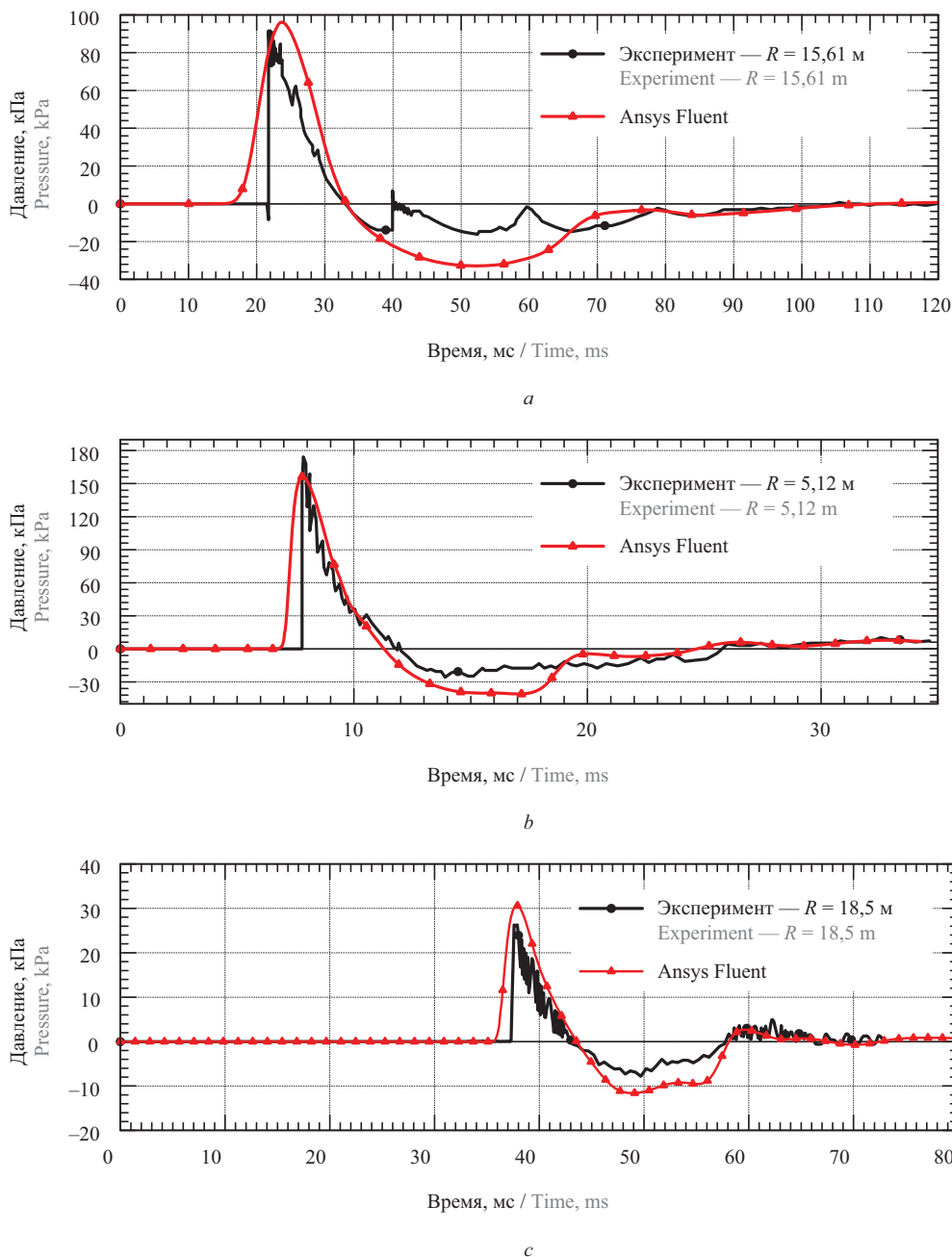


Рис. 3. Динамические параметры взрывного давления: *a* — эксперимент [19]; *b* — эксперимент [20]; *c* — эксперимент НИИ
Fig. 3. Dynamic parameters of the blast pressure: *a* — experiment [19]; *b* — experiment [20]; *c* — experiment conducted by the research institute

документа: РБ Г-05-039-96 и РБ НТЦ ПБ, содержащих положения по расчету параметров нагрузки при взрыве ТВС. За рубежом, в частности в Евросоюзе, помимо численного моделирования (CFD) широко применяется инженерный метод расчета нагрузок от взрыва, описанный в методике TNO CPR 14E⁵, раз-

⁵ CPR 14E. Methods for the calculation of physical effects. "Yellow book" By ed. C.J.H. van den Bosch. R.A. P.M. Weterings. Hague : Gevaarlijke Stoffen. 2005. 870 p.

работанной Голландской организацией (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek). В настоящей работе было проведено сравнение результатов экспериментов с численным моделированием и результатами расчета по нормативным методикам: РБ Г-05-039-96, РБ НТЦ ПБ, TNO CPR 14E (см. табл. 1).

Следует отметить, что нормативные инженерные методики расчета предусматривают только расчет

Результаты сравнения расчетов с экспериментами
Compared analytical and experimental results

Номер No.	Описание Description	R, м R, m	Параметры взрывной волны Explosive wave parameters			
			P, кПа P, kPa	Δ, %	I, кПа·с I, kPa·s	Δ, %
Тест 1 / Test 1	Эксперимент Groethe M. [19] Groethe M. experiment [19]		91,54	—	0,45	—
	Расчет CFD CFD Analysis		96,11	5,00	0,83	83,56
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety	15,61	83,15	−9,16	0,40	−10,22
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		106,87	16,75	0,46	2,89
	TNO CPR 14E		133,31	45,63	0,81	79,78
Тест 2 / Test 2	Эксперимент Nozu T. [20] Nozu T. Experiment [20]		174,23	—	0,06	—
	Расчет CFD CFD analysis		156,32	−10,28	0,32	50,39
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety	5,12	140,75	−19,21	0,18	−12,86
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		188,83	8,38	—	—
	TNO CPR 14E		214,10	22,89	—	—
Тест 3 / Test 3	Эксперимент НИИ Experiment of a research institute		26,28	—	0,06	—
	Расчет CFD CFD analysis		30,62	16,51	0,12	87,81
	РБ НТЦ ПБ Safety Guidelines of the Academic Technology Centre of Fire Safety	18,50	—	—	—	—
	РБ Г-05-039-96 Safety Guidelines G-05-039-96		32,53	23,76	—	—
	TNO CPR 14E		29,24	11,26	—	—

Примечание: R — расстояние от эпицентра взрыва; P — максимальное избыточное давление в УВ; I — максимальное значение импульса; Δ — отклонение от экспериментального значения.

Note: R — distance to ground zero; P — maximal excessive pressure in the compressive wave; I — maximal impulse value; Δ — deviation from the experimental value.

параметров ВУВ без учета взаимодействия с преградами (зданиями или сооружениями). Исключением является методика ЗАО НТЦ ПБ, в которой приведены соотношения для параметров отраженной УВ при ее нормальном падении на преграду. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на применение инженерных методик расчета в практике проектирования, поскольку проектируемые площади бывают достаточно часто сильно загромождены. По этой причине в табл. 1 для экспериментов 2 и 3 отсутствуют результаты расчетов значения импульсов для точек на поверхности преграды. Рассчитанные по нормативным методикам давления P в табл. 1 для экспериментов 2 и 3 определялись из известного соотношения для пикового давления отражения, включенного также в СП 296.1325800.2017:

$$P = 2P_s \frac{7P_0 + 4P_s}{7P_0 + P_s}, \quad (9)$$

где P_s — максимальное избыточное давление на фронте волны.

Анализ результатов численного моделирования взрыва показал, что расчетные и экспериментальные кривые давления достаточно хорошо согласуются между собой (см. рис. 3). Максимальные избыточные давления незначительно отличаются от экспериментальных данных (см. таблицу), что, как правило, достаточно для прикладных инженерных расчетов.

Исходя из анализа полей распределения давления установлено, что защитная стена снижает до двух раз давление ВУВ для защищаемого здания. Давление

на передней грани защитной стены составило $P_{\text{МАКС}} \approx 30$ кПа, тогда как давление на передней грани модели $P_{\text{МАКС}} \approx 13$ кПа.

Выводы

Проведенное численное моделирование распространения взрывной волны при различных условиях показало качественное и количественное совпадение с рассматриваемыми экспериментами. Во всех рассчитанных тестах имеется значительный запас по импульсу в сравнении с экспериментальными данными. Также можно выделить совпадение расчетных эпюр давления с экспериментальными. Полученные в ходе численного моделирования эпюры давления могут быть применены в динамическом расчете строительных конструкций.

Рассмотренный расчетный метод позволяет достаточно точно реализовать профиль давления на любую поверхность здания или сооружения при внешнем детонационном взрыве ТВС и оценить несущую способность строительных конструкций. Что подтверждается результатами сравнения различных экспериментов с численным моделированием. Общий принцип, заложенный в этом методе, может быть использован при моделировании распространения и взаимодействия взрывной волны со зданиями и сооружениями как при взрыве ТВС, так и при взрыве конденсированных ВВ.

Таким образом, предложенный подход к расчету нагрузок при внешнем детонационном взрыве ТВС может применяться при проектировании зданий или сооружений различной конфигурации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Хуснутдинов Д.З., Мишуев А.В., Казеннов В.В., Комаров А.А., Громов Н.В. Аварийные взрывы газоздушных смесей в атмосфере. М. : МГСУ. 2014. 80 с.
2. Комаров А.А. Прогнозирование нагрузок от аварийных дефлаграционных взрывов и оценка последствий их воздействия на здания и сооружения : дис. ... д-ра техн. наук. М. 2001. 492 с.
3. Шаргатов В.А., Сумской С.И., Софьин А.С. Верификация модели распространения волн избыточного давления программного комплекса TOXI+CFD // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 5. С. 44–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-44-52
4. Комаров А.А., Бажина Е.В. Определение уровня взрывоопасности городской застройки, прилегающей к энергоемким объектам // Природообустройство. 2019. № 2. С. 105–109. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-105-109
5. Remennikov A.M., Rose T.A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries // Computers and Structures. 2005. Vol. 83. Issue 27. Pp. 2197–2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
6. Lucas M., Skjold T., Hisklen H. Computational fluid dynamics simulations of hydrogen releases and vented deflagrations in large enclosures // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2020. Vol. 63. P. 103999. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103999
7. Zibarov A.V. Gasdynamicstool package — system for numerical gas dynamic non-steady process modeling // ASME. 1999. Vol. 397-1. Pp. 117–123.

8. Molkov V.V., Cirrone D.M.C., Shentsov V.V., Dery W., Kim W., Makarov D.V. Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire // *Advances in Pulsed and Continuous Detonations : Collected papers* / Edited by S.M. Frolov. Moscow. 2019. Pp. 260–274. DOI: 10.30826/ICPCD201821
9. Bauwens C.R., Dorofeev S.B. CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014. Vol. 39. Issue 35. Pp. 20447–20454. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.04.142
10. Hansen R., Johnson D.M. Improved farfield blast predictions from fast deflagrations, DDTs and detonations of vapour clouds using FLACS CFD // *Loss Prevention in the Process Industries*. 2015. Vol. 35. Pp. 293–306. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.005
11. Van Den Berg A.C., Mercx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J. AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis // TNO Prins Maurits Laboratory. 1994. 15 p.
12. Chern Jinn Gan E., Remennikov A.M., Ritzel D. Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment // *International Journal of Impact Engineering*. 2021. Vol. 158. P. 104004. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104004
13. Vyazmina E., Jallais S., Beccantini A., Trelat S. CFD design of protective walls against the effects of vapor cloud fast deflagration of hydrogen // *ICHS 6th*, Yokohama, Japan. 2015.
14. Jallais S., Vyazmina E., Miller D., Thomas J.K. Hydrogen jet vapor cloud explosion: A model for predicting blast size and application to risk assessment // *Process Safety Progress*. 2018. Vol. 37. Issue 3. Pp. 397–410. DOI: 10.1002/prs.11965
15. Smith P.D., Rose T.A. Blast wave propagation in city streets — an overview // *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2006. Vol. 8. Pp. 16–28.
16. Kim D., Kim J. Numerical method to simulate detonative combustion of hydrogen-air mixture in a containment // *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2019. Vol. 13. Issue 1. Pp. 938–953. DOI: 10.1080/19942060.2019.1660219
17. Brode H.L. Numerical solutions of spherical blast waves // *Journal of Applied Physics*. 1955. Vol. 26. Issue 6. Pp. 766–775.
18. Larcher M., Casadei F. Explosions in complex geometries — a comparison of several approaches // *International Journal of Protective Structures*. 2010. Vol. 1. Issue. 2. Pp. 169–195.
19. Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007. Vol. 32. Pp. 2125–2133. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.016
20. Nozu T., Tanaka R., Ogawa T., Hibi K., Sakai Y. Numerical simulation of hydrogen explosion tests with a barrier wall for blast mitigation // *1st International Conference on Hydrogen Safety*, Pisa, 8–10 September. 2005.

REFERENCES

1. Khusnutdinov D.Z., Mishuev A.V., Kazennov V.V., Komarov A.A., Gromov N.V. *Crash explosions of gas-air mixtures in the atmosphere*. Moscow, MGSU Publ., 2014; 80. (rus).
2. Komarov A.A. *Predicting loads from emergency deflagration explosions and assessing the consequences of their impact on buildings and structures : dissertation ... doctor of technical sciences*. Moscow, 2001; 492. (rus).
3. Shargatov V.A., Sumskoi S.I., Sofyin A.S. Verification of the model of overpressure waves propagation in the TOXI+CFD software. *Occupational Safety in Industry*. 2018; 5:44-52. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-44-52 (rus).
4. Komarov A.A., Bazhina E.V. Determination of the explosive level of the urban site development adjacent to power-intensive objects. *Prirodoobustrojstvo*. 2019; 2:105-109. DOI: 10.34677/1997-6011/2019-2-105-109 (rus).
5. Remennikov A. M., Rose T. A. Modelling blast loads on buildings in complex city geometries. *Computers and Structures*. 2005; 83(27):2197-2205. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.04.003
6. Lucas M., Skjold T., Hiskens H. Computational fluid dynamics simulations of hydrogen releases and vented deflagrations in large enclosures. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020; 63:103999. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103999
7. Zibarov A.V. Gasdynamicstool package — System for numerical gas dynamic nonsteady process modeling. *ASME*. 1999; 397-1:117-123.
8. Molkov V.V., Cirrone D.M.C., Shentsov V.V., Dery W., Kim W., Makarov D.V. Blast wave and fireball after hydrogen tank rupture in a fire. *Advances in Pulsed and Continuous Detonations: Collected papers*. S.M. Frolov (ed.). Moscow. 2019; 260-274. DOI: 10.30826/ICPCD201821

9. Bauwens C.R., Dorofeev S.B. CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2014; 39(35):20447-20454. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.04.142
10. Hansen R., Johnson D.M. Improved farfield blast predictions from fast deflagrations, DDTs and detonations of vapour clouds using FLACS CFD. *Loss Prevention in the Process Industries*. 2015; 35:293-306. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.005
11. Van Den Berg A.C., Mercx W.P.M., Mouilleau Y., Hayhurst C.J. AutoReaGas – A CFD – Tool for gas explosion hazard analysis. *TNO Prins Maurits Laboratory*. 1994; 15.
12. Chern Jinn Gan E., Remennikov A.M., Ritzel D. Investigation of trees as natural protective barriers using simulated blast environment. *International Journal of Impact Engineering*. 2021; 158:104004. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.104004
13. Vyazmina E., Jallais S., Beccantini A., Trelat S. CFD design of protective walls against the effects of vapor cloud fast deflagration of hydrogen. *ICHS 6th*. Yokohama, Japan, 2015.
14. Jallais S., Vyazmina E., Miller D., Thomas J.K. Hydrogen jet vapor cloud explosion: A model for predicting blast size and application to risk assessment. *Process Safety Progress*. 2018; 37(3):397-410. DOI: 10.1002/prs.11965
15. Smith P.D., Rose T.A. Blast wave propagation in city streets — an overview. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 2006; 8:16-28.
16. Kim D., Kim J. Numerical method to simulate detonative combustion of hydrogen-air mixture in a containment. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2019; 13(1):938-953. DOI: 10.1080/19942060.2019.1660219
17. Brode H.L. Numerical solutions of spherical blast waves. *Journal of Applied Physics*. 1955; 26(6):766-775.
18. Larcher M., Casadei F. Explosions in complex geometries — a comparison of several approaches. *International Journal of Protective Structures*. 2010; 1(2):169-195.
19. Groethe M., Merilo E., Colton J., Chiba S., Sato Y., Iwabuchi H. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2007; 32:2125-2133. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.016
20. Nozu T., Tanaka R., Ogawa T., Hibi K., Sakai Y. Numerical simulation of hydrogen explosion tests with a barrier wall for blast mitigation. *1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, 8-10 September, 2005*.

Поступила 22.10.2021, после доработки 29.11.2021; принята к публикации 01.02.2022
Received October 22, 2021; Received in revised form November 29, 2021; Accepted February 1, 2022

Информация об авторах

ЛИПЛЕНКО Максим Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; РИНЦ ID: 761794; ORCID: 0000-0001-7640-6072; e-mail: Liplenko@gmail.com

БОРОДЕНКО Александр Николаевич, старший научный сотрудник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; ORCID: 0000-0003-2549-9066; e-mail: canchecc@rambler.ru

МОСОЛОВ Георгий Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела технологии строительства и ремонта, Научно-исследовательский институт трубопроводного транспорта, Россия, 117186, г. Москва, Севастопольский пр-т, 47а; РИНЦ ID: 884901; ORCID: 0000-0001-7949-1022; e-mail: mosolovgv@mail.ru

Information about the authors

Maxim A. LIPLENKO, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a, Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ID RISC: 761794; ORCID: 0000-0001-7640-6072; e-mail: LiplenkoMA@niitnn.transneft.ru

Alexandr N. BORODENKO, Senior Researcher, Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a, Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-2549-9066; e-mail: canchecc@rambler.ru

Georgiy V. MOSOLOV, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Civil and Industrial Engineering, Pipeline Transport Institute, 47a Sevastopolskiy Prospect, Moscow, 117186, Russian Federation; ID RISC: 884901; ORCID: 0000-0001-7949-1022; e-mail: mosolovgv@mail.ru

Вклад авторов:

Липленко М.А. — разработка методики расчета, проведение численного моделирования, оформление результатов расчетов, написание текста статьи, составление заключения.

Бороденко А.Н. — участие в экспериментальных исследованиях, оформление результатов экспериментальных исследований, доработка текста статьи.

Мосолов Г.В. — научное руководство, участие в разработке программы и методики испытаний, составление заключения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors:

Maxim A. Liplenko — development of a calculation method, carrying out numerical modeling, formalizing the calculation results, writing the text of an article, final conclusions.

Alexandr N. Borodenko — participation in experimental research, registration of the results of experimental research, revision of the text of the article.

Georgiy V. Mosolov — scientific management, participation in the development of the test program and methodology, final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.