

УДК 536.24

Ю.А. СКОБ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТРОЙСТВ СНИЖЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ВОДОРОДА

Рассматриваются физические процессы взрыва облака водорода, которое образуется в результате мгновенного разрушения баллона высокого давления на заправочной станции. Для моделирования процессов формирования водородо-воздушной смеси и ее сгорания используется трехмерная модель мгновенного взрыва газовой смеси на базе уравнений движения Эйлера, дополненных законами сохранения компонентов смеси, которые решаются методом Годунова. Для снижения влияния эффектов избыточного давления в ударной волне на окружающее пространство предлагается использовать ряд защитных мероприятий различной конструкции. Оценка эффективности устройств проводится с помощью контроля изменения избыточного давления в нескольких критических точках. Для снижения нагрузки на конструкции защитных устройств также предлагается ряд конструктивных мероприятий.

Ключевые слова: численное моделирование, ударная волна, избыточное давление, взрыв водорода.

Введение

Степень безопасности функционирования предприятий авиационной промышленности, на которых используется водород в качестве топлива или как элемент технологического процесса, зависит от надежной работы оборудования и эффективности мероприятий защиты обслуживающего персонала и окружающих построек от последствий чрезвычайных ситуаций, возникающих при сбоях в работе оборудования: утечках водорода на стыках трубопроводов, испарении при разливе жидкого водорода из танков хранения, крупномасштабных выбросах сжатого газообразного водорода при разрушении емкостей высокого давления [1]. Наиболее опасным сценарием развития аварийной ситуации является взрыв водородо-воздушного облака, формирование ударной волны, которая быстро распространяется от эпицентра взрыва и негативно воздействует на окружающую среду. Основным поражающим фактором при этом является максимальное избыточное давление во фронте ударной волны.

Эффективность защитных мероприятий обычно проверяется обычно путем натурных испытаний [2 – 4]. Однако непредсказуемый характер водорода, который объясняется такими свойствами как низкая плотность, высокая энергия сгорания и быстрый переход горения к детонации, требует замены дорогостоящего физического эксперимента компьютерной симуляцией на основе адекватных математических моделей рассматриваемых физических процессов выброса, рассеяния и взрыва водорода в атмосфере [5 – 13]. Современные компьютерные систе-

мы позволяют провести трехмерный анализ всех газодинамических параметров потока в расчетной области, которая содержит защитное мероприятие, и получить прогноз изменения избыточного давления в характерных контрольных точках пространства и сделать выводы об эффективности каждого защитного устройства.

1. Математическая модель и алгоритм расчета

Для сравнительного вычислительного эксперимента, позволяющего оценить эффективность защитных мероприятий от избыточного давления ударной взрывной волны, использовалась математическая модель мгновенного взрыва водородо-воздушной смеси [10 – 12]. Предполагается, что основным фактором, влияющим на рассматриваемые физические процессы, является конвективный перенос массы, импульса и энергии. Поэтому, достаточно использовать упрощенные уравнения Навье-Стокса, которые получены отбрасыванием вязких членов в уравнениях движения смеси (Эйлеров подход с источниками членами) [11].

Расчетная область представляет собой параллелепипед, который расположен в правой декартовой системе координат (рис. 1) и разбит на пространственные ячейки, размеры которых определяются масштабом характерных особенностей области (шероховатостью поверхностей, габаритами объектов).

Согласно используемой модели взрыва предполагается, что глобальная мгновенная химическая реакция имеет место во всех элементарных объемах вычисли-

тельных ячеек, где концентрация водорода находится в пределах воспламенения ($Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$). Это значит, что параметры двух-компонентной смеси (воздух и горючее) в контрольных объемах мгновенно приобретают новые значения соответствующих параметров трех-компонентной смеси (воздух, продукты сгорания и остатки горючего). Предполагается, что фронт пламени распространяется с бесконечно большой скоростью [12].

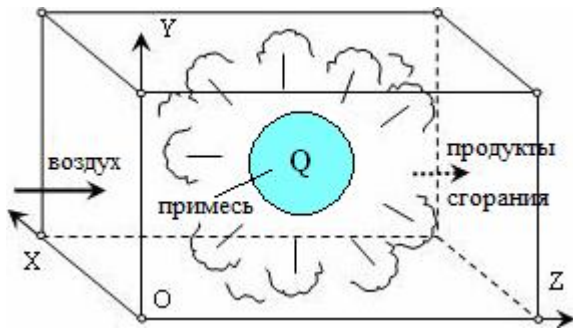


Рис. 1. Компьютерная модель взрыва облака водорода с концентрацией Q

Компьютерное решение системы фундаментальных уравнений газовой динамики для смеси, дополненной законами сохранения массы примесей в интегральной форме, получено явным методом Годунова [14]. Для аппроксимации уравнений Эйлера используется конечно-разностная схема первого порядка. Центральные разности второго порядка используются для диффузионных источников членов в уравнениях сохранения примесей. Простая интерполяция давления применяется в вертикальном направлении. Метод Годунова характеризуется робастным алгоритмом, устойчивым к большим возмущениям параметров потока (например, давления), что позволяет получать решение при моделировании крупно-масштабных взрывов газовых смесей.

Математическая модель была верифицирована относительно экспериментальных данных лаборатории Fraunhofer ICT для взрыва водорода и взрыва пропана [13].

Для анализа формирования облака водорода, его взрыва и рассеяния продуктов сгорания в атмосфере, а также для прогноза изменения избыточного давления в контрольных точках расчетной области для оценки эффективности защитных мероприятий использовалась компьютерная система «Expert-2» (Научный Центр Оценки Риска «Rizikon»).

2. Расчет взрыва облака водорода

Рассматривается типичная станция для заправки водородом транспортных средств [1]. Станция

содержит криогенную емкость для хранения жидкого водорода ($5,7 \text{ м}^3$), которая снабжает цилиндры высокого давления ($6500 \text{ psi} = 44,8 \text{ МПа}$) для хранения сжатого газообразного водорода, предназначенного для заправки. Объем каждого цилиндра составляет $0,51 \text{ м}^3$.

Предположим, что один из раздаточных цилиндров высокого давления мгновенно разрушается, что приводит к выбросу сжатого водорода, расширению его до атмосферного давления 101325 Па с подмешиванием чистого воздуха до образования полусферического стехиометрического облака радиусом 2 м у земли с температурой окружающей среды 293 К (рис. 2). Рассмотрим мгновенный взрыв сформировавшегося облака водорода с образованием в контрольном объеме продуктов сгорания со следующими параметрами: температурой 3450 К , давлением 901325 Па , молярной массой $0,02441 \text{ кг/моль}$ и коэффициентом адиабаты $1,24$.

Предполагается, что некоторые защитные мероприятия будут предусматривать расположение отдельных элементов ниже поверхности земли, поэтому часть расчетной области будет занимать слой земли (рис. 3) толщиной 2 м .

Для анализа эффективности защитных мероприятий избыточное давление контролировалось (по аналогии с работами [5, 7, 12, 13]) в нескольких критических точках у земли: P_0 – в непосредственной близости у защитного сооружения, P_1 и P_2 – на некотором удалении от него (рис. 2, 3). Кроме того, анализировалось максимальное избыточное давление на поверхности защитного сооружения со стороны взрыва для оценки максимальной нагрузки.

2.1. Отсутствие защитных устройств (случай 0)

Данный вариант расчета соответствует наиболее пессимистическому сценарию (рис. 2), когда контрольные точки максимально открыты воздействию ударной взрывной волны по сравнению с любыми другими вариантами защиты, что отражено на рис. 4 – 6.

Естественно, что избыточное давление для данного случая меньше других вариантов в контрольной точке P_0 , так как преграда отсутствует, но превышает другие значения в контрольных точках P_1 и P_2 из-за отсутствия защиты.

2.2. Применение сплошной защитной стены (случай 1)

Установка защитной сплошной бетонной стены шириной 10 м , толщиной $0,2 \text{ м}$ и высотой 2 м (рис. 2, 3) приводит к существенному перестроению потока (рис. 7).

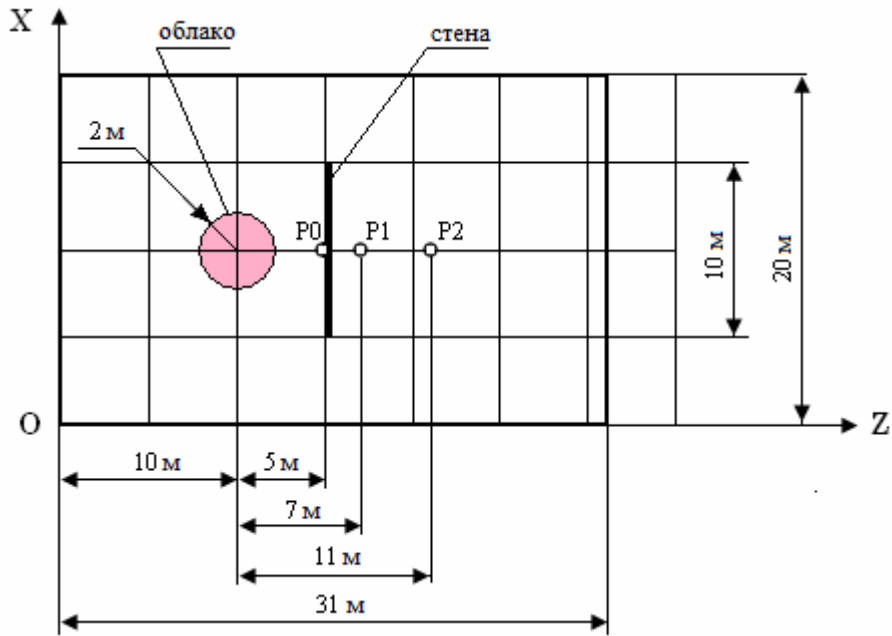


Рис. 2. Схема расположения облака водорода, защитного сооружения и контрольных точек

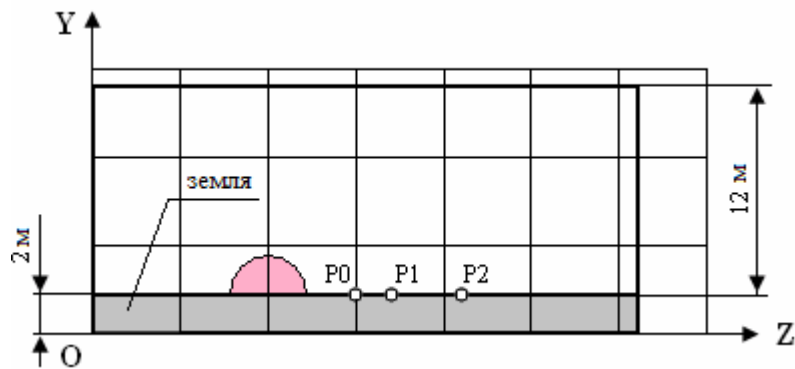


Рис. 3. Вертикальные геометрические характеристики расчетной области

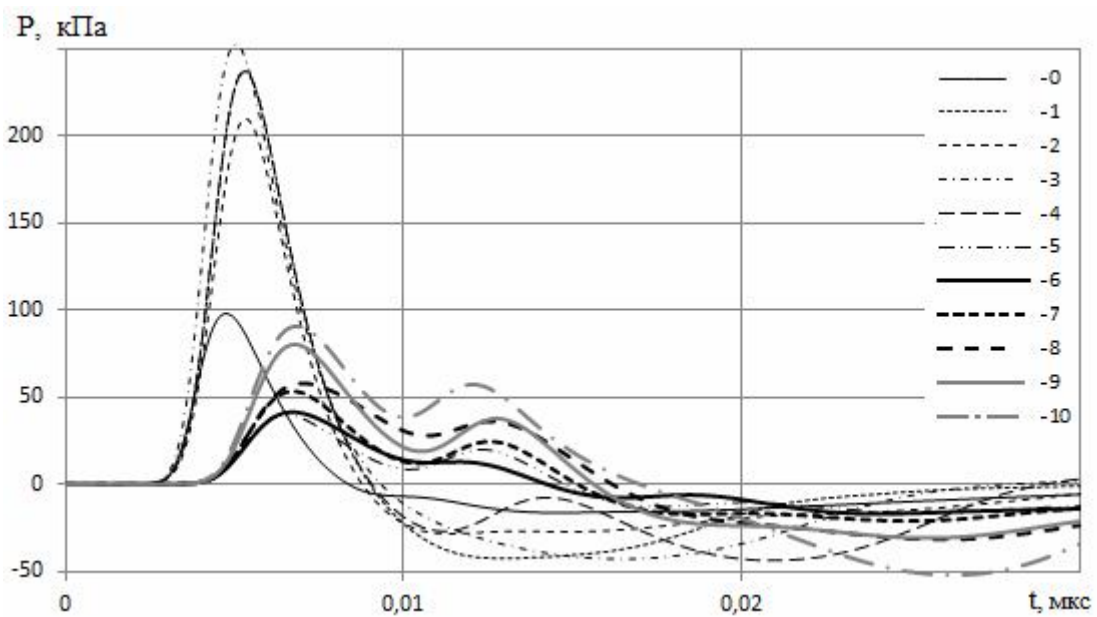


Рис. 4. Изменение избыточного давления в контрольной точке P0 (1-10 – варианты устройств)

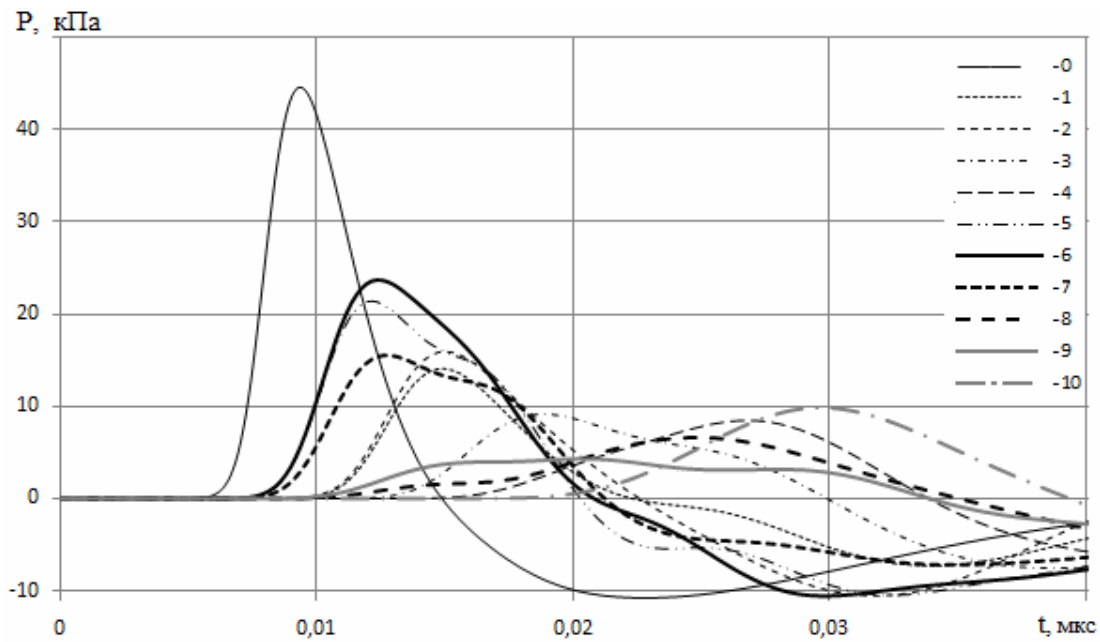


Рис. 5. Изменение избыточного давления в контрольной точке P1 (1-10 – варианты устройств)

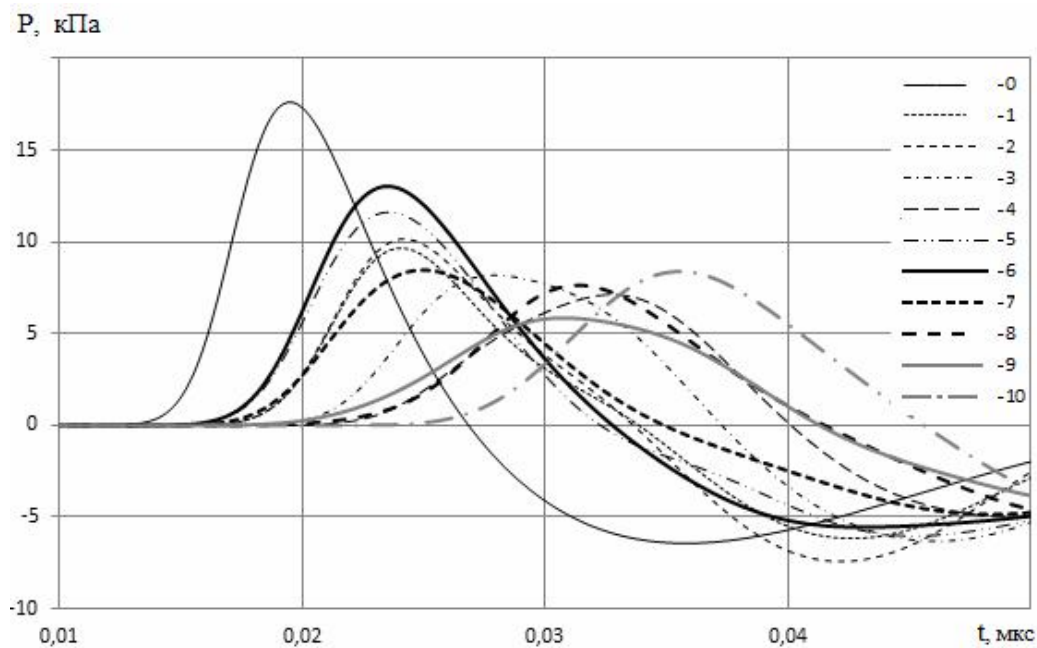


Рис. 6. Изменение избыточного давления в контрольной точке P2 (1-10 – варианты устройств)

Соответственно, существенно увеличивается избыточное давление перед стеной в точке P0, но при этом наблюдается его снижение в точках P1 и P2 – местах возможного расположения персонала (рис. 4 – 6). Распределение давления на поверхности стены свидетельствует о нагрузках, которые могут привести к образованию трещин [7] и разрушению стены (рис. 8).

Для снижения нагрузки на защитное сооружение необходимо предусмотреть некоторые конструктивные изменения, некоторые из которых рассматриваются в данной работе (случаи 2, 7 – 9).

2.3. Использование перепуска (случай 2)

Одним из мероприятий, которое позволяет уменьшить максимальное избыточное давление на стене, является перепускной канал шириной 0,6 м под стеной на глубину 1,2 м.

В данном случае наблюдается уменьшение пиковой нагрузки на стене (рис. 9) при незначительном влиянии на избыточное давление в контрольных точках P1 и P2 (рис. 5, 6).

Перепускной канал соединяет пространство с повышенным давлением перед стеной с пространством за стеной, что вызывает перетекание под стеной и в какой-то степени снижает пиковую нагрузку на стену.

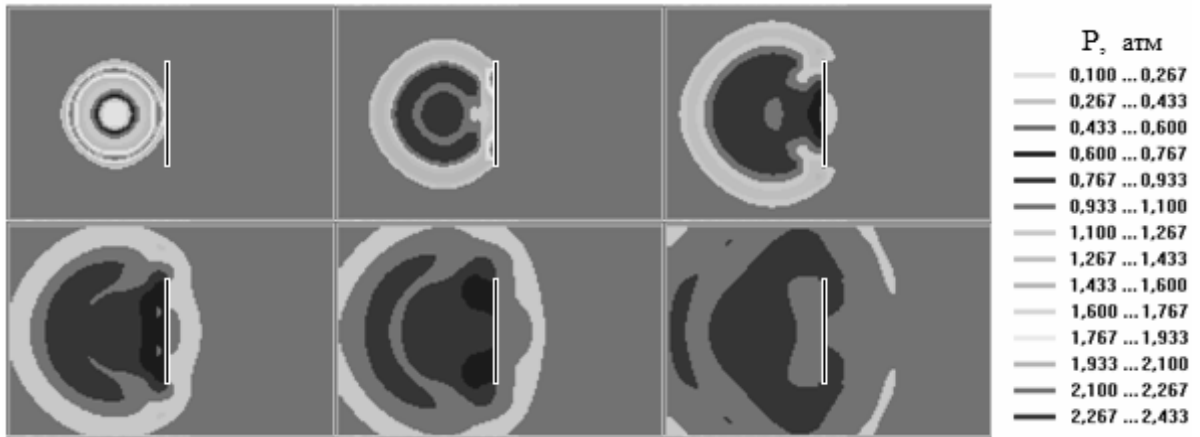


Рис. 7. Изменение давления в расчетной области у земли (случай 1) в моменты времени: 0,004 мкс; 0,008 мкс; 0,012 мкс; 0,016 мкс; 0,020 мкс; 0,028 мкс

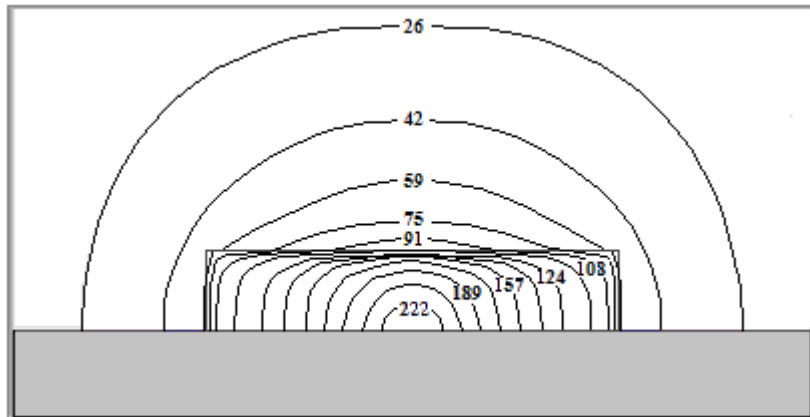


Рис. 8. Распределение максимального избыточного давления (кПа) в плоскости у поверхности стены

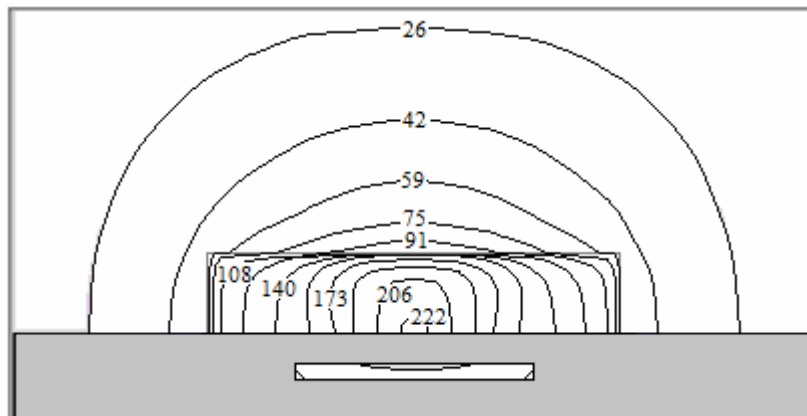


Рис. 9. Распределение максимального избыточного давления (кПа) у стены с каналом

2.4. Использование защитной стены большей высоты (случай 3)

Одним из определяющих факторов, влияющих на распределение давления в контрольных точках P1 и P2, является высота стены. Естественно, что увеличение высоты стены в данном случае до 3 м приводит к снижению пиковых избыточных давлений за стеной в отличие от случая 1 (рис. 5, 6). Поэтому данная высота была выбрана для остальных защитных устройств (случаи 7 – 10).

2.5. Использование Т-образной защитной стены (случай 4)

Эффективность защитной стены для случая 3 можно повысить, выполнив сверху козырек, выступающий на 1 м по обе стороны от стены (рис. 10).

По экспериментальным данным работы [7] это приводит к двукратному расширению потока на кромках козырька, что положительно сказывается на показателях избыточного давления в контрольных точках P1 и P2 (рис. 5, 6).

2.6. Использование углубления под эпицентром взрыва (случай 5)

Еще одним мероприятием по снижению давления в контрольных точках является углубление подпространства с облаком водорода по отношению к поверхности земли. Поместим облако в яму квадратной формы 3x3 м и высотой 2 м (рис. 11).

В процессе взрыва кромки ямы играют роль козырька на стенке, да и само углубление выполняет кумулятивную функцию, разгружая избыточное давление в вертикальном направлении, что благоприятно сказывается на поведении давления в контрольных точках (рис. 4 – 6).

2.7. Использование разгрузочных полостей в углублении под взрывом (случай 6)

Взрыв в углублении (случай 5) приводит к увеличению избыточного давления на стенках ямы, особенно в углах внизу. Снизить пиковые нагрузки в этих областях можно с помощью разгрузочных полостей по периметру ямы (рис. 12).

Такая конструкция углубления приводит к некоторой перестройке потока во время взрыва (рис. 13), хотя не существенно влияет на избыточное давление в контрольных точках (рис. 4 – 6).

2.8. Использование пакета столбиков шаблона 1 (случай 7)

Заслуживает внимание применение не только отдельных мероприятий, но и их комбинация. Дополним заглубление области взрыва (случай 5) и набором из четырех рядов столбиков квадратного сечения (0,2 x 0,2 м) высотой 3 м. Ряды столбиков отстоят друг от друга на расстоянии 0,2 м (рис. 14) и расположены за контрольной точкой P0 (вместо сплошной стены).

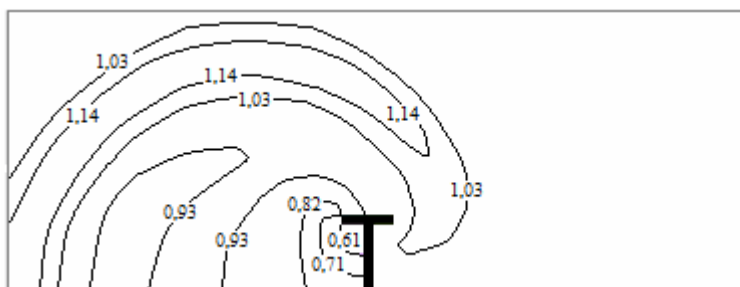


Рис. 10. Распределение давления (атм) в момент времени 0,0168 мкс после взрыва (случай 4)

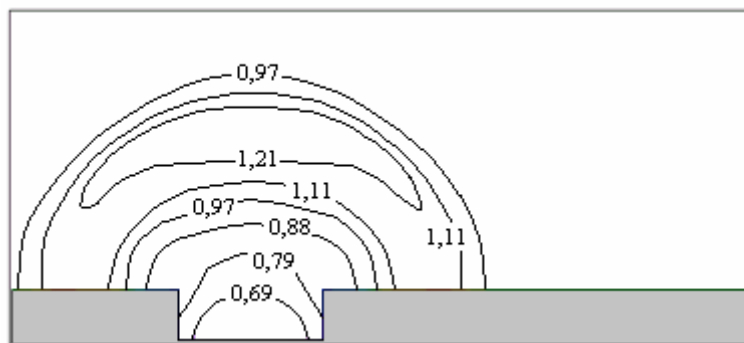


Рис. 11. Распределение давления (атм) в момент времени 0,0157 мкс после взрыва (случай 5)

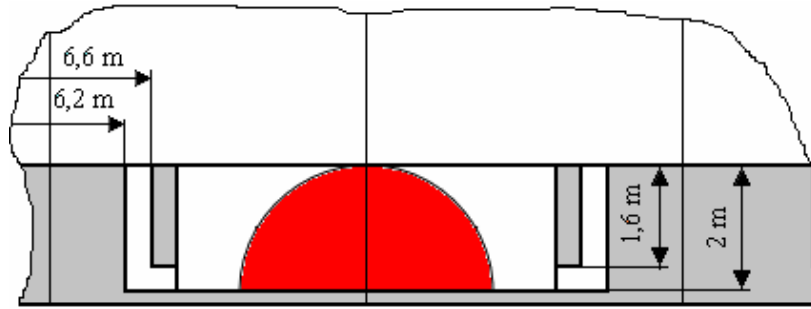


Рис. 12. Характерные размеры разгрузочных полостей (случай 6)

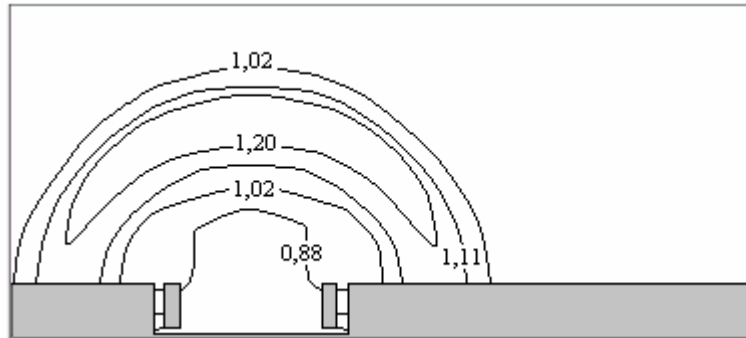


Рис. 13. Распределение давления (атм) в момент времени 0,0158 мкс после взрыва (случай 6)

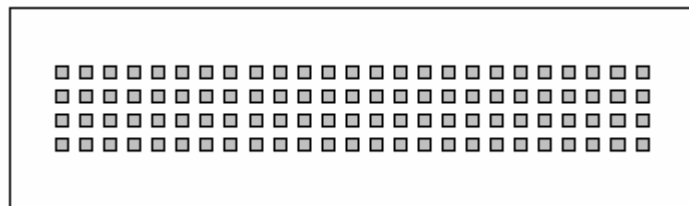


Рис. 14. Шаблон 1 расположения столбиков (случай 7)

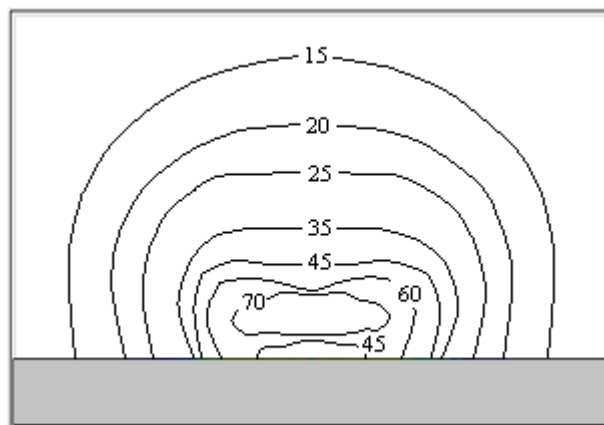


Рис. 15. Распределение максимального давления (кПа) на поверхности у преграды (случай 7)

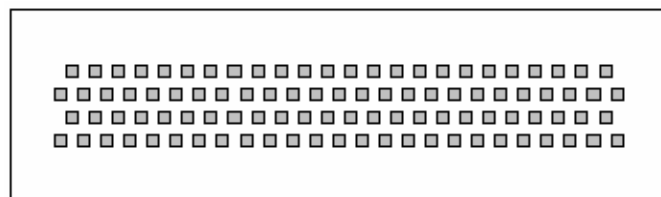


Рис. 16. Шаблон 1 расположения столбиков (случай 8)

Такая конструкция приводит к частичной потере интенсивности ударной волны в процессе многократного отражении от столбиков (рис. 15) и позволяет снизить нагрузку на препятствие.

2.9. Использование пакета столбиков шаблона 2 (случай 8)

Конструкцию устройства для случая 7 изменим, расположив столбики по шаблону 2 (рис. 16).

Теперь конструкция приводит к большей степени рассеяния ударной волны в процессе прохождения между столбиками (рис. 17) и позволяет снизить нагрузку на препятствие.

2.10. Применение перфорированной стены (случай 9)

Сплошная стена случая 3 дает хорошую защиту, но приводит к чрезмерной нагрузке на поверхность препятствия.

Выполнение несплошной конструкции снижает данную нагрузку.

Выполним преграду из двух бетонных стен (как в случае 3), которые отстоят друг от друга на 0,4 м, и перфорированы рядами отверстий квадратного сечения 0,2 x 0,2 м. Причем отверстиям на одной стене соответствуют сплошные участки другой стены (рис. 18).

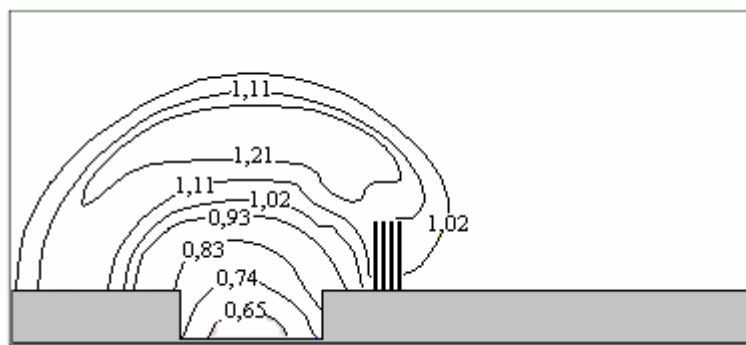


Рис. 17. Распределение давления (атм) в момент времени 0,0158 мкс после взрыва (случай 8)

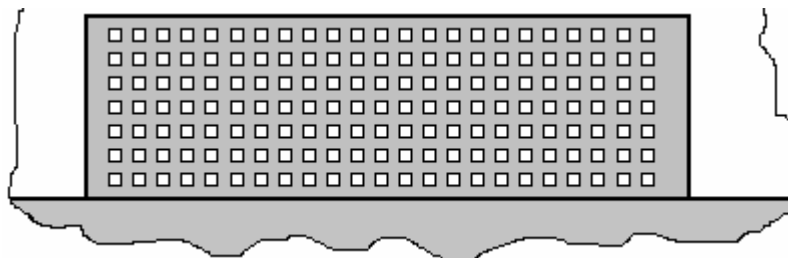


Рис. 18. Шаблон перфорации стены (случай 9)

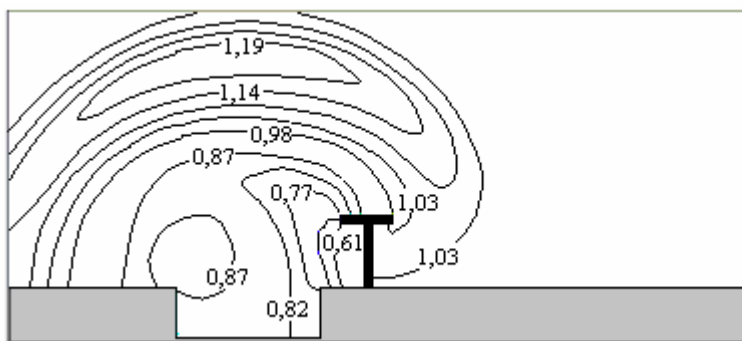


Рис. 19. Распределение давления (атм) в момент времени 0,023 мкс после взрыва (случай 10)

Теперь конструкция приводит к комбинированному эффекту: частичной разгрузке препятствия за счет рассеяния ударной волны в процессе прохождения в отверстия на стенах и позволяет эффективно преградить путь ударной волне к контрольным точкам за преградой (рис. 4 – 6).

2.11. Применение углубления в комбинации с Т-образной стеной (случай 10)

Т-образная сплошная стена (случай 4) и заглупления зоны взрыва (случай 5) дают одну из лучших защит от воздействия избыточного давления при прохождении взрывной ударной волны через контрольные точки P1 и P2. Поэтому использование комбинации этих устройств тоже должно давать эффективную защиту (рис. 5, 6). Присутствие этих устройств радикально влияет на ударную волну и приводит к перестройке потока (рис. 19).

Заключение

Рассмотрены физические процессы взрыва полусферического облака водорода, которое образуется в результате мгновенного разрушения баллона высокого давления на заправочной станции. Используется трехмерная модель мгновенного взрыва газовой смеси на базе уравнений Эйлера, которые решаются методом Годунова.

Проведен сравнительный анализ эффективности различных мероприятий (сплошная стена различной конфигурации, пакет перфорированных стен, наборы столбиков двух шаблонов, заглупление области взрыва, разгрузочные полости под стеной и в заглупленной зоне взрыва), которые защищают от последствий воздействия избыточного давления ударной волны.

На основании контроля изменения избыточного давления в критических точках и сравнительного анализа трехмерных картин максимальных избыточных давлений в расчетной области можно сделать выводы о том, что наиболее эффективными средствами защиты являются преграды в виде сплошной Т-образной стены, пакета из нескольких рядов столбцов шаблона 2, пакета из двух рядом стоящих перфорированных стен в комбинации с заглуплением зоны взрыва ниже поверхности земли. Для снижения нагрузки на поверхности защитных препятствий можно рекомендовать разгрузочные каналы под устройством, соединяющие зоны до и после препятствия и перфорацию преград набором отверстий. Применение таких устройств позволяет повысить уровень безопасности функционирования обслуживающего персонала и оборудования предприятия, использующего водород.

Литература

1. *Safety and Security Analysis [Текст]: Investigative Report by NASA on Proposed EPA Hydrogen-Powered Vehicle Fueling Station / Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environment Protection Agency, EPA420-R-04-016 October 2004. – 45 p.*
2. *Schneider, H. Large Scale Experiments: Deflagration and Deflagration to Detonation within a partial Confinement similar to a lane [Электронный ресурс] / H. Schneider // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120018.pdf> – 3.06.2011 г.*
3. *Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model [Электронный ресурс] / T. Tanaka, T. Azuma, J.A. Evans, P.M. Cronin [etc.] // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120036.pdf> – 3.06.2011 г.*
4. *Keßler, A. Hydrogen detection: visualization of hydrogen using noninvasive optical schlieren technique BOS [Электронный ресурс] / A. Keßler, W. Ehrhardt, G. Lang // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/110127.Pdf> – 3.06.2011 г.*
5. *Gallego, E. An Intercomparison Exercise on the Capabilities of CFD Models to Predict Deflagration of a Large-Scale H₂-Air Mixture in Open Atmosphere [Электронный ресурс] / E. Gallego, J. Garcia, E. Migoia, A. Crespo [etc.] // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120003.pdf> – 3.06.2011 г.*
6. *Breitung, W. Analysis methodology for hydrogen behaviour in accident scenarios [Электронный ресурс] / W. Breitung // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120009.pdf> – 3.06.2011 г.*
7. *Nozu, T. Numerical Simulation of Hydrogen Explosion Tests with a Barrier Wall for Blast Mitigation [Электронный ресурс] / T. Nozu, R. Tanaka, T. Ogasawa, K. Hibi [etc.] // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/130028.pdf> – 3.06.2011 г.*
8. *Takeno, K. Phenomena of Dispersion and Explosion of High Pressurized Hydrogen [Электронный ресурс] / K. Takeno, K. Okabayashi, T. Ichinose, A. Kouchi [etc.] // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/100044.pdf> – 3.06.2011 г.*
9. *Dorofeev, S.B. Evaluation of safety distances related to unconfined hydrogen explosions [Электронный ресурс] / S.B. Dorofeev // 1-st International Con-*

ference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/100129.pdf> – 3.06.2011 г.

10. Hansen, O.R. Validation of FLACS-hydrogen CFD consequence prediction model against large scale H₂ explosion experiments in the flame facility [Электронный ресурс] / O.R. Hansen, J. Renoult, M.P. Sherman, S.R. Tieszen // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/120075.pdf>. – 3.06.2011 г.

11. Granovskiy, E.A. Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture u Dispersion in Atmosphere [Электронный ресурс] / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 10 p. – Режим доступа: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2005/Papers/110021.pdf>. – 3.06.2011 г.

12. Granovskiy, E.A. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Deflagrations [Элект-

ронный ресурс] / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // 2-nd International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. требования: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows XP ; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Назва з контейнера.

13. Skob, Yu.A. Numerical Modeling of Hydrogen Deflagration Dynamics in Enclosed Space [Электронный ресурс] / Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov, K.P. Korobchynskiy, V.V. Shentsov [etc.] // 3-d International Conference on Hydrogen Safety. – Ajaccio-Corsica (France). – 2009. – 12 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. – Систем. требования: Pentium ; 32 Mb RAM ; Windows XP ; Adobe Acrobat Reader 6.0. – Назва з контейнера.

14. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко [и др.] – М.: Наука, 1976. – 400 с.

Поступила в редакцию 4.06.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры информатики М.Л. Угрюмов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСОБІВ ЗНИЖЕННЯ НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ПІД ЧАС ВИБУХУ ВОДНЮ

Ю.О. Скоб

Розглядаються фізичні процеси вибуху хмари водню, яка створюється в результаті миттєвого руйнування ємності високого тиску на паливній станції. Для моделювання процесів формування воднево-повітряної суміші та її згоряння використовуються тривимірна модель миттєвого вибуху газової суміші, що базується на рівняннях Ейлера з додаванням законів зберігання компонентів суміші і розв'язуються методом Годунова. Для зниження впливу ефектів надлишкового тиску в ударній хвилі на навколишній простір використовуються декілька захисних засобів різної конструкції. Оцінка ефективності засобів провадиться за допомогою контролю зміни надлишкового тиску в низці критичних точках. Для зниження навантаження на конструкції захисних засобів також пропонується низка конструктивних рішень.

Ключові слова: чисельне моделювання, ударна хвиля, надлишковий тиск, вибух водню.

EFFECTIVENESS EVALUATION OF FACILITIES PROTECTING FROM HYDROGEN-AIR EXPLOSION OVERPRESSURE

Y.A. Skob

Three-dimensional mathematical model of hydrogen release, dispersion and detonation is developed. The process is described by gas dynamics differential equations completed by conservation laws of mixture components. It is assumed that instantaneous explosion takes place in the volume where hydrogen concentration is between the ignition limits. The model takes into account turbulent diffusion and an influence of excess air ratio on combustion products parameters. Predicted detonation history and spatial overpressure distribution is used to estimate the effectiveness of different types of safety facilities mitigating negative effects of explosion of hydrogen released as a result of instantaneous destruction of high pressure cylinders at fueling station.

Key words: numerical modeling, shock wave, overpressure, hydrogen explosion

Скоб Юрий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yuriy.skob@gmail.com.