

УДК 533.27:519.63

К.П. КОРОБЧИНСКИЙ, Ю.А. СКОБ, М.Л. УГРЮМОВ, В.В. ШЕНЦОВ

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

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВА ВОДОРОДА В АТМОСФЕРЕ

Выполнено численное моделирование взрыва облака газообразного водорода, образовавшегося в результате мгновенного разрушения баллонов высокого давления на заправочной станции. Проведен анализ различных способов защиты зданий окружающей застройки от разрушительного воздействия ударной взрывной волны. Выработаны рекомендации по выбору размеров зоны отчуждения вокруг заправочной станции.

моделирование, смешение газов, взрыв, химическое взаимодействие, атмосфера

Введение

Водород получает все более широкое применение в качестве рабочего тела в производственных циклах на предприятиях авиационно-космической промышленности, а также на авиационном транспорте в качестве альтернативного топлива, безвредного для окружающей среды. Однако такие характеристики водорода, как низкая плотность, высокая энергия сгорания, быстрый переход от горения к детонации создают проблемы безопасного хранения, доставки водородного топлива, размещения раздаточных объектов по отношению к окружающим конструкциям. Нарушение герметичности оборудования, разрушение емкостей хранения водорода, сжатого под высоким давлением, приводят к выбросу его в атмосферу, формированию взрывоопасной смеси с воздухом. В результате этого возникает реальная угроза воспламенения водородно-воздушной смеси, детонационного взрыва, и, как следствие, значительного материального ущерба и человеческих жертв.

Взрыв водорода сопровождается возникновением области с высокими значениями температуры и давления. Первый фактор приводит к возгораниям и пожарам, а второй – к появлению мощной ударной волны, которая с большой скоростью распространяется от эпицентра взрыва, разрушая окружающие

производственные и жилые постройки. Широкомасштабный физический эксперимент, моделирующий вышеперечисленные газодинамические явления, является дорогостоящим мероприятием, трудно переносимым на реальные условия промышленного предприятия. Поэтому целесообразно заменить физический эксперимент численным. Для прогнозирования нагрузок на конструкции, возникающих при взрыве, обычно определяют избыточное давление и импульс ударной волны на основе полуэмпирических уравнений регрессии [1 – 3]. Однако, используемые при этом экспериментальные данные, как правило, получены в открытом пространстве без учета сложного рельефа местности. Существующие в настоящее время методы численного моделирования перехода горения в детонацию, например [4], разработаны для модельных задач. Поэтому проблема создания математической модели, адекватно описывающей нестационарные процессы формирования взрывоопасных газовых смесей в трехмерном пространстве, их взрыва, с учетом химического взаимодействия компонент смесей, и дальнейшего рассеяния продуктов сгорания в атмосфере является актуальной. Компьютерная система, которая реализует данную математическую модель, позволит анализировать и прогнозировать трехмерные поля концентрации взрывоопасной примеси, термодинамические параметры смеси во времени (до и после

взрыва) и пространстве, оценивать возможные разрушения окружающих конструкций в результате воздействия взрывной ударной волны.

1. Математическая модель течения

Наиболее полное описание физических процессов формирования взрывоопасных газовых смесей в атмосфере и их горения возможно только с использованием системы нестационарных уравнений Навье-Стокса для сжимаемого газа [5]. Однако недостаточная мощность современных компьютеров, сложности в подборе адекватной модели турбулентности не позволяют эффективно осуществлять прямое численное решение этих уравнений. Поэтому существует необходимость построения новых, упрощенных моделей и расчетных схем для численного моделирования такого рода течений. В работе [6] в результате структурного анализа течения и декомпозиции полной математической модели газодинамического процесса принято в качестве предположения допущение о том, что основное влияние на процесс оказывает конвективный обмен массой, импульсом и энергией. Таким образом, для описания процессов нестационарного трехмерного смешения двухкомпонентного газа в рассматриваемом случае достаточно использовать усеченные уравнения Навье-Стокса, полученные путем отбрасывания вязких членов (приближение Эйлера с использованием источниковых членов) [6, 7]. Система уравнений дополняется законом переноса компоненты смеси (горючий газ, продукты сгорания) с учетом скорости диффузии (коэффициент турбулентной диффузии \mathfrak{D} определялся по методике, предложенной М.Е. Берляндом [8]) и замыкается уравнением состояния смеси.

Целью данной работы является использование построенной математической модели [6] для адекватного описания нестационарных процессов формирования взрывоопасных водородо-воздушных смесей в

трехмерном пространстве, их взрыва (с учетом химического взаимодействия компонент смесей) и численной оценки воздействия взрывной ударной волны на окружающие конструкции (рис. 1).

При постановке граничных условий полагается, что расходная составляющая скорости не превосходит скорость звука. Набегающий поток на входе определяется величинами полной энтальпии, энтропийной функции, направлением вектора скорости потока и относительной массовой плотностью примеси $Q \leq 1$.

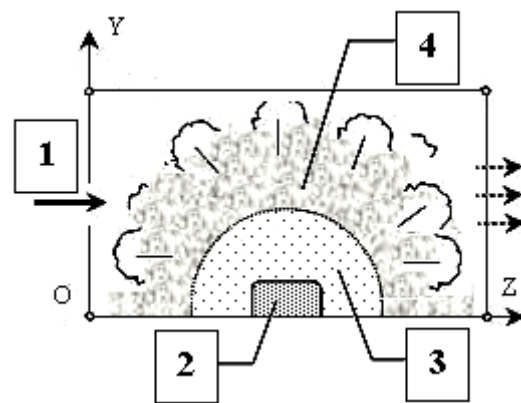


Рис. 1. Расчетная схема взрыва газового облака:
1 – воздух; 2 – сжатый газ; 3 – горючая смесь;
4 – продукты сгорания

Параметры потока на входе определяются из равенств (3, 4) с учетом заданных $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ с привлечением соотношения для “левого” инварианта Римана [9]. На непроницаемых участках, ограничивающих расчетную область поверхностями, выполняются условия «непротекания»: $q_n = 0$, где \vec{n} – вектор нормали к рассматриваемой границе. Граничные условия на выходе будем задавать на поверхностях тех граней конечно-разностных ячеек, которые примыкают к границам расчетной области и через которые предполагается вытекание или втекание смеси. В выходных областях, кроме атмосферного давления P_A , задаваемого либо взятого из эксперимента, использовались соотношения для “правого” инварианта Римана [9].

В начальный момент времени во всех «газообразных» ячейках расчетной области принимаются параметры окружающей среды. В ячейках, занимаемых облаком газообразной примеси, которое образовалось в результате мгновенного выброса, относительная массовая концентрация примеси принимается равной $Q=1$ (100%). В ячейках с испарением или истечением газа задается закон изменения расхода примеси.

2. Модель взрыва смеси газов

В соответствии с предложенной моделью взрыва [7] предполагается, что взрыв происходит мгновенно, горение происходит в постоянном объеме, занимаемом взрывоопасной смесью с концентрацией горючего в пределах воспламеняемости. После взрыва в локализованном объеме газодинамические параметры двухкомпонентной смеси (воздух и горючее) изменялись на газодинамические параметры трехкомпонентной смеси (воздух, продукты сгорания и остаток горючего).

Общая масса горючей смеси m включает массы окислителя m' , горючего, участвующего m'' и не участвующего m_0'' в горении. Отсюда масса окислителя в смеси равна:

$$m' = m - m'' - m_0'' . \quad (1)$$

Массовые концентрации соответствующих компонент смеси, осредненные по объему расчетной области, позволяют определить коэффициент избытка воздуха α в смеси:

$$\alpha = \frac{m'}{\vartheta_0 m''} = \frac{1 - Q'' - Q_0''}{\vartheta_0 Q''} , \quad (2)$$

где $\vartheta_0 = \frac{m'_{th}}{m''}$ – стехиометрическое число, m'_{th} – масса воздуха, теоретически необходимая для полного сгорания 1 кг топлива.

Задаем нижнюю теплоту сгорания горючей примеси H_u из таблиц теплофизических свойств ве-

ществ. Молярная масса μ_{np} и коэффициент адиабаты k_{np} продуктов сгорания определяются на основе гипотезы обратимости реализующихся химических реакций.

В случае, когда $\alpha \geq 1$, теплофизические свойства газовой смеси после взрыва определяются по формулам:

$$\mu = \frac{1}{\frac{1 - (\vartheta_0 + 1)Q'' - Q_0''}{\mu'} + \frac{(\vartheta_0 + 1)Q'' + Q_0''}{\mu''}} , \quad (3)$$

$$C_p = [1 - (\vartheta_0 + 1)Q'' - Q_0''] C_p' + (\vartheta_0 + 1)Q'' C_p^{np} + Q_0'' C_p'' , \quad (4)$$

$$C_v = [1 - (\vartheta_0 + 1)Q'' - Q_0''] C_v' + (\vartheta_0 + 1)Q'' C_v^{np} + Q_0'' C_v'' \quad (5)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} . \quad (6)$$

В случае, когда $\alpha < 1$, теплофизические свойства газовой смеси после взрыва определяются по формулам:

$$\mu = \frac{\vartheta_0}{\frac{(1 + \vartheta_0)Q'}{\mu_{np}} + \frac{\vartheta_0 - (1 + \vartheta_0)Q'}{\mu''}} , \quad (7)$$

$$C_p = (1 - Q_{np}) C_p'' + Q_{np} C_p^{np} , \quad (8)$$

$$C_v = (1 - Q_{np}) C_v'' + Q_{np} C_v^{np} , \quad (9)$$

$$k = \frac{C_p}{C_v} . \quad (10)$$

В обоих случаях газодинамические параметры смеси (давление, температура, плотность) равны:

$$P = \frac{H_u m''_{th} (k - 1)}{V} + P_a = \frac{H_u (1 - Q'' - Q_0'') m'' (k - 1)}{\vartheta_0 Q'' V} + P_a , \quad (11)$$

$$T = \frac{PV\mu}{mR_{yH}} ; \quad (12)$$

$$\rho = \frac{m}{V} . \quad (13)$$

В момент взрыва в объеме, занимаемом взрыво-

опасной смесью, газодинамические параметры смеси воздуха и горючего мгновенно изменялись на газодинамические параметры смеси воздуха, продуктов сгорания и остатков горючего. В дальнейшем эта трехкомпонентная смесь продолжает движение в расчетной области. В результате ударная волна распространяется от эпицентра взрыва, воздействуя на конструкции окружающей застройки. Если максимальная амплитуда возникающего перепада давления превышает предельно допустимые нормы, то можно сделать вывод о возможных разрушениях.

3. Алгоритм численного решения

Законы сохранения массы, импульса, энергии и переноса каждой компоненты смеси в интегральной форме для каждой расчетной ячейки численно решались с использованием схемы распада произвольного разрыва (метод С.К. Годунова [9]), которая обеспечивает построение разрывных решений без выделения разрывов. Совокупность газодинамических параметров во всех ячейках в момент времени t^n представляет собой известное решение на временном слое с индексом n . Параметры в следующий момент времени $t^{n+1} = t^n + \tau$ рассчитывались посредством применения явных конечно-разностных аппроксимаций. Устойчивость конечно-разностной схемы обеспечивается за счет выбора величины шага по времени τ .

Математическая модель газодинамического процесса взрыва газовых облаков в атмосфере была верифицирована сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными взрывов облака стехиометрической пропановоздушной смеси [2], а также водородовоздушной смеси [10]. Результаты расчетов с приемлемой точностью согласуются с экспериментальными данными, что позволяет использовать математическую модель для решения поставленной задачи.

4. Расчет взрыва облака водорода

Рассматривается станция заправки транспортных средств водородным топливом. Раздаточная станция имеет криогенную цистерну с жидким водородом ($5,7 \text{ м}^3$). Цистерна питает три пакета баллонов (по 12 баллонов в каждом блоке) высокого давления общим объемом $18,4 \text{ м}^3$, в которых хранится газообразный водород при температуре окружающей среды.

При работе заправочной станции возможны аварийные ситуации, вызванные утечкой газообразного водорода различной интенсивности из неисправного оборудования, проливом жидкого водорода из цистерны, выбросом газообразного водорода в результате разрушения баллонов высокого давления. Все эти аварии приводят к формированию взрывоопасного облака водородно-воздушной смеси и его рассеянию в атмосфере под воздействием ветра. Одним из наиболее опасных сценариев с точки зрения потенциальных катастрофических последствий, угрожающих оборудованию станции, персоналу и населению близлежащих жилых построек [11] является детонационный взрыв водородно-воздушной смеси в результате выброса в атмосферу всего объема сжатого газообразного водорода из баллонов высокого давления.

В данной работе моделировался взрыв водородно-воздушной смеси на описанной ранее заправочной станции. Предполагалось, что облако взрывоопасной смеси сформировалось в результате выброса всего объема сжатого газообразного водорода из баллонов раздачи и дальнейшего его рассеяния в потоке набегающего со скоростью 10 м/с воздуха. В качестве начальных условий были приняты следующие параметры облака: объем 798 м^3 , масса водорода в облаке $687,4 \text{ кг}$, массовая концентрация водорода 100% , давление $1031371,3 \text{ Па}$, температура 288 К . Предполагалось, что рассеяние облака происходило в течение $0,06 \text{ с}$ после мгновенного разрушения баллонов (физический взрыв). После этого, в результате внешнего воздействия, происходил дето-

национный взрыв образовавшейся водородно-воздушной смеси (химический взрыв). Химический взрыв сопровождается появлением продуктов сгорания и ударной волны, которая оказывает воздействие на хозяйственные и жилые постройки. План местности с застройкой представлен на рис. 2. Высота застройки составляла 5–12 м. Варьировалось местоположение заправочной станции (позиции А и

В на рис. 2) по отношению к застройке, а также средств защиты зданий (обвалование, отбойная стена) от разрушительного воздействия ударной взрывной волны.

Изменение давления во времени контролировалось в эпицентре взрыва и в характерной точке на стене здания у земли (позиции А, В и С на рис. 2, соответственно).

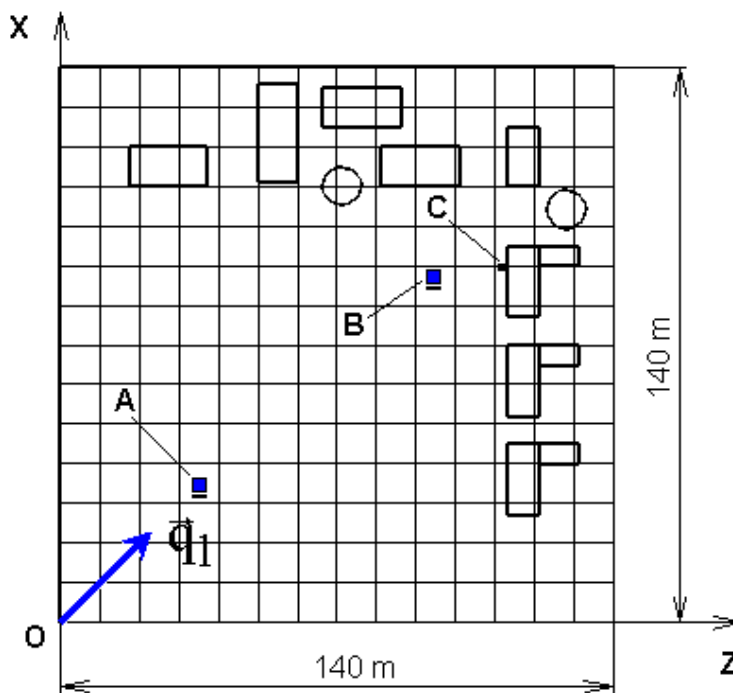


Рис. 2. План местности с застройкой (А, В – возможные местоположения заправочной станции; С – точка контроля давления на стене здания)

4.1. Взрыв облака водорода вблизи застройки.

Рассматривался случай расположения заправочной станции в непосредственной близости от зданий застройки (позиция В на рис. 2). Никаких средств защиты застройки от разрушительного воздействия ударной волны от взрыва облака не применялось. Распределение объемной концентрации водорода в смеси с воздухом представлено на рис. 3. Очевидно, что радиус полусферической зоны детонационного горения составляет примерно 25 м и превосходит максимальную высоту застройки.

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в контрольной точке С достигло максимального значения, представлено на рис. 4. Анализ данных пока-

зывает, что давление во фронте ударной волны в угловых зонах у оснований зданий выше примерно в два раза, чем в открытом пространстве.

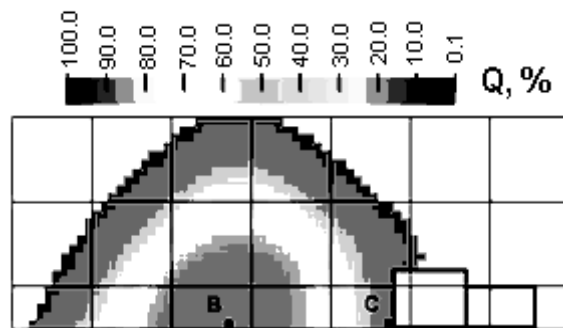


Рис. 3. Распределение объемной концентрации водорода в смеси с воздухом (В – эпицентр взрыва, С – точка контроля давления на стене здания) в плоскости YOZ

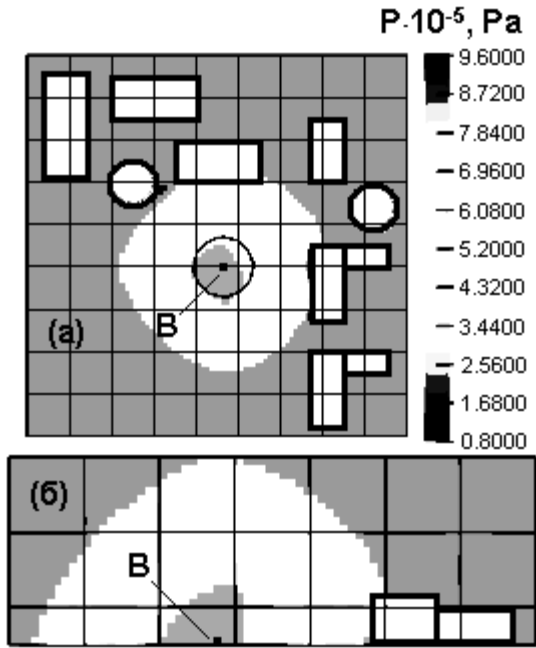


Рис. 4. Распределение давления в плоскостях: XOZ у земли (а), YOZ (б)

Изменение во времени давления в контрольной точке С представлено на рис. 5. Максимальный пик давления соответствует моменту времени прохождения ударной волны – результата химического взрыва. Постепенно со временем после взрыва амплитуда ударной волны быстро затухает (рис. 5).

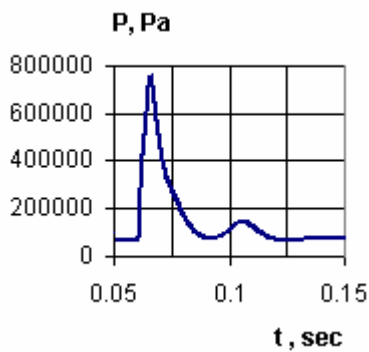


Рис. 5. Изменение во времени давления в точке С

4.2. Взрыв облака водорода на удалении от застройки. Рассматривался случай расположения заправочной станции на удалении от зданий застройки (позиция А на рис. 2). Расстояние от заправочной станции до ближайших зданий выбиралось на основе рекомендаций [11]. Никаких средств для защиты застройки от разрушительного воздействия ударной

волны от взрыва облака не применялось. Анализ распределения объемной концентрации водорода в смеси с воздухом показал, что размер и форма зоны детонационного горения аналогичны случаю с ближней застройкой (рис. 3).

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в контрольной точке С достигло максимального значения, представлено на рис. 6.

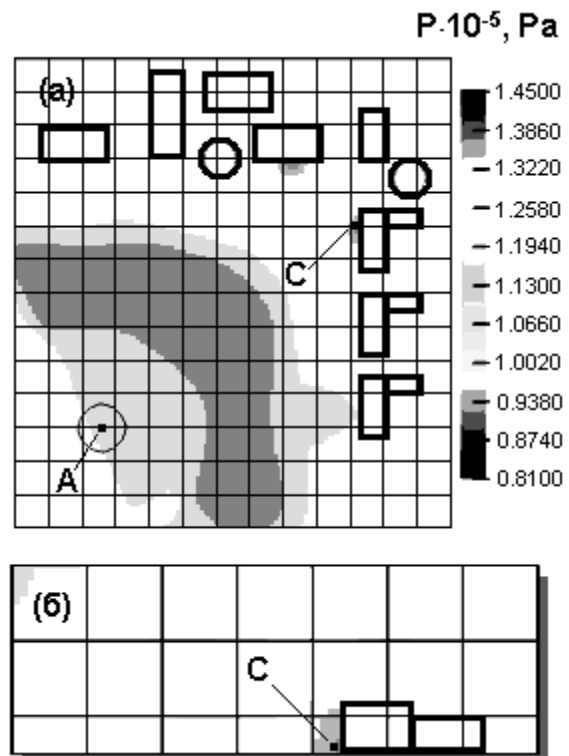


Рис. 6. Распределение давления в плоскостях: а – XOZ у земли, б – YOZ

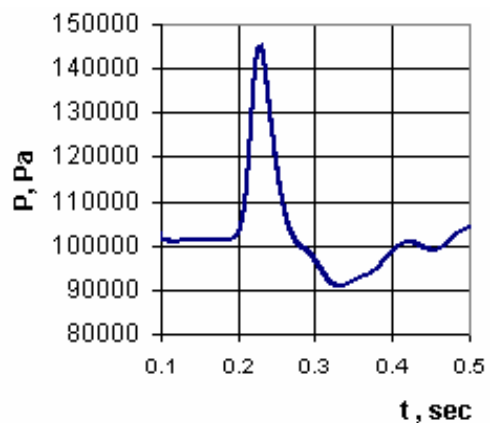


Рис. 7. Изменение во времени давления в точке С

Изменение во времени давления в контрольной точке С представлено на рис. 8. Форма кривой соответствует классическому убыванию давления при воздействии ударной волны, возникающей в результате взрыва газовой смеси. Следует отметить, что удаление эпицентра взрыва от застройки приводит к существенному снижению давления (примерно в 5 раз) на стены зданий застройки (рис. 5, 7).

4.3. Взрыв облака водорода на удалении от застройки с полным обвалованием. Рассматривался аналогичный п. 4.2 случай удаленного расположения станции от застройки (позиция А на рис. 2). Для защиты застройки от разрушительного воздействия ударной волны от взрыва облака применялась обвалование эпицентра взрыва высотой 7 м (рис. 8, 9, а). Анализ распределения объемной концентрации водорода в смеси с воздухом показал, что размеры и форма зоны детонационного горения изменились вследствие сложного рельефа обвалования (рис. 8).

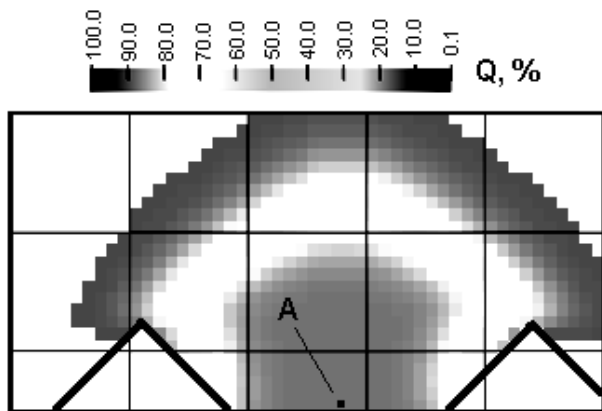


Рис. 8. Распределение объемной концентрации водорода в смеси с воздухом (В – эпицентр взрыва, С – точка контроля давления на стене здания) в плоскости YOZ

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в контрольной точке С достигло максимального значения, представлено на рис. 9. Поле давления в расчетной области изменилось несущественно по сравнению с результатами расчетов, описанных в п. 4.2 для случая удаленного взрыва без обвалования.

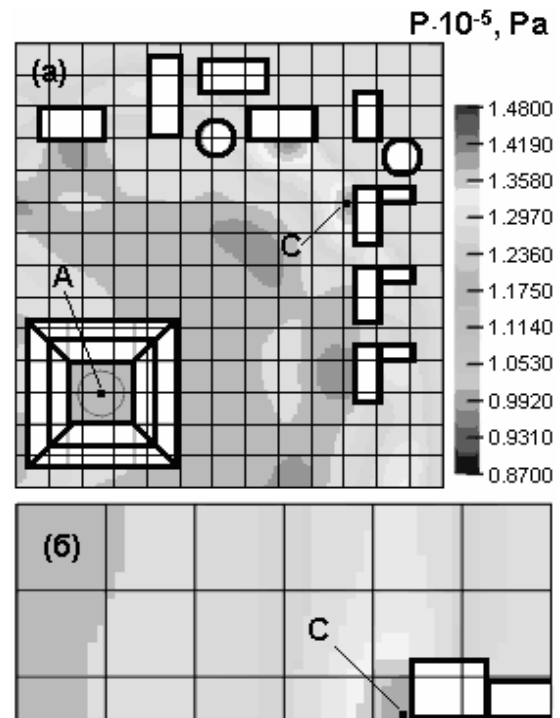


Рис. 9. Распределение давления в плоскостях: а – XOZ у земли, б – YOZ

4.4. Взрыв облака водорода на удалении от застройки с частичным обвалованием. Рассматривался аналогичный п. 4.3 случай удаленного расположения станции от застройки (позиция А на рис. 2). Для защиты застройки от разрушительного воздействия ударной волны от взрыва облака применялась частичное северо-восточное обвалование эпицентра взрыва высотой 7 м (рис. 10, 11, а). Анализ распределения объемной концентрации водорода в смеси с воздухом показал, что размеры и форма зоны детонационного горения несколько изменились в соответствии с формой обвалования (рис. 10).

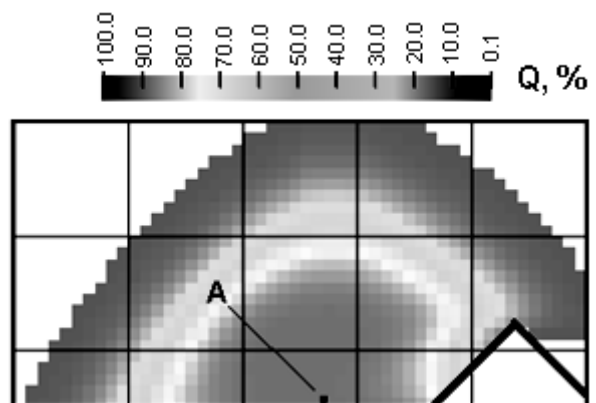


Рис. 10. Распределение объемной концентрации водорода в смеси с воздухом

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в контрольной точке С достигло максимального значения, представлено на рис. 11. Анализ данных показывает, что частичное обвалование (по сравнению с полным обвалованием) практически не изменило характер распределения давления на местности.

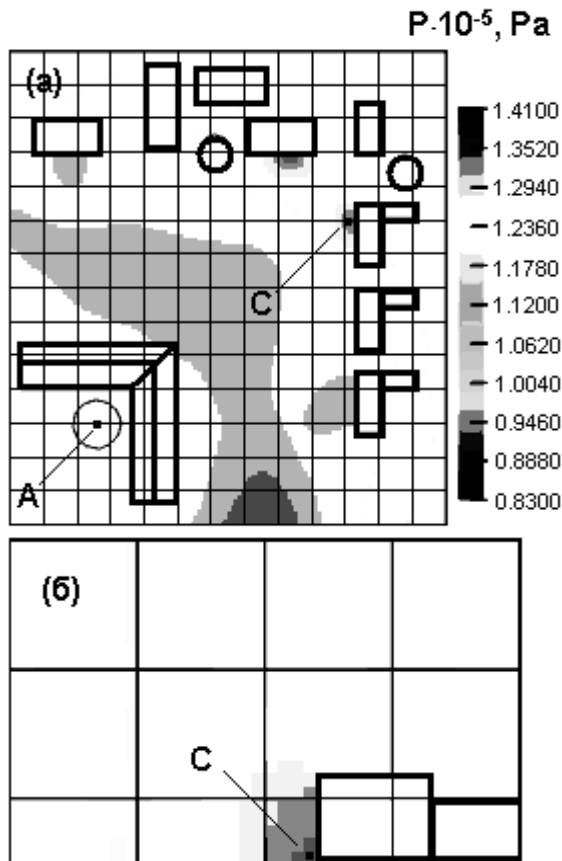


Рис. 11. Распределение давления в плоскостях: а – XOZ у земли, б – YOZ

4.5. Удаленный взрыв частичным повышенным обвалованием. Рассматривался аналогичный п. 4.4 случай удаленного расположения станции от застройки (позиция А на рис. 2). Для защиты застройки от разрушительного воздействия ударной волны от взрыва облака применялась частичное северо-восточное обвалование эпицентра взрыва высотой 13 м (рис. 12, а), которое располагалось на 12 м дальше от эпицентра взрыва, чем в случае п. 4.4. Анализ распределения объемной концентрации водорода в смеси с воздухом показал, что размеры и

форма зоны детонационного горения близки случаю без обвалования (рис. 4).

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в контрольной точке С достигло максимального значения, представлено на рис. 12. Анализ данных показывает, что увеличение высоты обвалования рассматриваемой формы позволяет незначительно снизить нагрузку на стены зданий (рис. 12, б).

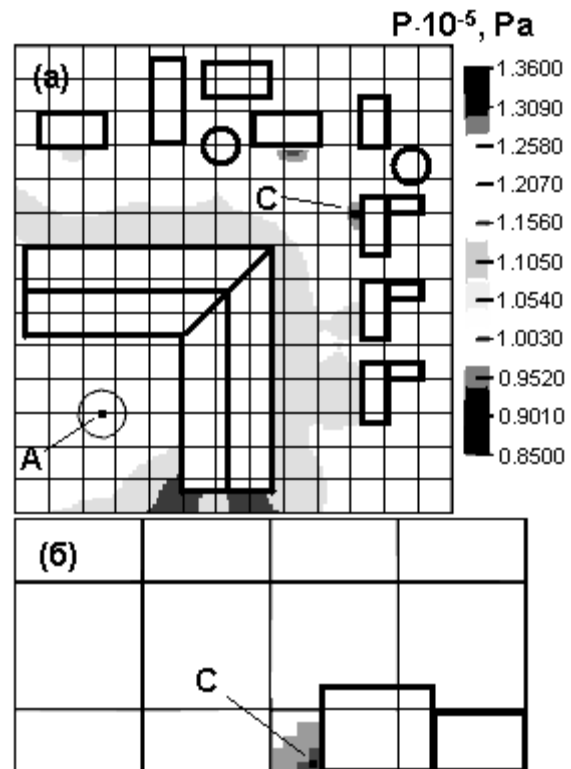


Рис. 12. Распределение давления в плоскостях: а – XOZ у земли, б – YOZ

4.6. Удаленный взрыв облака водорода с отбойной стеной у застройки. Рассматривался аналогичный п. 4.2 случай удаленного расположения заправочной станции от застройки (позиция А на рис. 2). Для защиты застройки от разрушительного воздействия взрывной ударной волны применялась отбойная стена высотой 8 м и толщиной 3 м в непосредственной близости от зданий (рис. 13, а).

Распределение давления в плоскостях XOZ у земли и YOZ в момент времени, когда давление в

контрольной точке С достигнуло максимального значения, представлено на рис. 14. Анализ данных показывает, что постройка отбойной стены приводит к снижению давления в контрольной точке примерно на 10% по сравнению со случаем без защитных сооружений (рис. 6, б, 13).

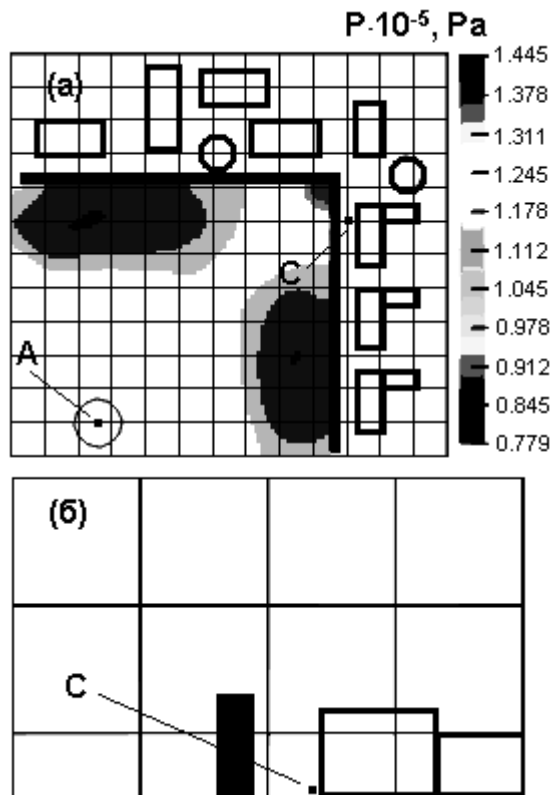


Рис. 13. Распределение давления в плоскостях: а – XOZ у земли, б– YOZ

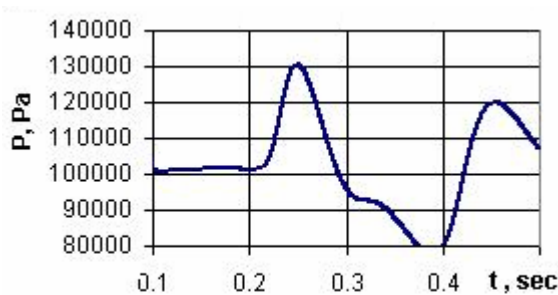


Рис. 14. Изменение давления в точке С

Следует отметить, что все рассмотренные виды защитных сооружений не позволили снизить максимальное избыточное давление в контрольной точке на стене здания до безопасного уровня.

Заключение

Разработана математическая модель газодинамических процессов формирования двухкомпонентной взрывоопасной газовой смеси, ее взрыва и рассеяния продуктов сгорания в атмосфере. Конечно-разностная схема развита для случая трехмерной системы уравнений движения газовой динамики, дополненной законами сохранения массы газовой примеси и продуктов сгорания. Разработан алгоритм расчета теплофизических параметров смеси газов, образующихся в результате мгновенного взрыва с учетом химического взаимодействия. Рассмотрен алгоритм численного решения полученной разностной схемы на основе метода С.К. Годунова. Разработана компьютерная система, моделирующая взрывы обогащенных и обедненных взрывоопасных газовых смесей в атмосфере. Верификация математической модели показала приемлемую ее точность в сравнении с известными экспериментальными данными, что позволяет использовать ее для моделирования последствий возможных аварий на промышленных объектах хранения водорода.

Выполнено численное моделирование взрыва облака газообразного водорода, образовавшегося в результате мгновенного разрушения баллонов высокого давления на заправочной станции.

Проведен анализ различных способов защиты зданий окружающей застройки от разрушительного воздействия ударной взрывной волны.

Показано, что рассмотренные виды защитных сооружений (частичное или полное обвалование эпицентра взрыва, отбойная стена у зданий застройки) оказывают влияние на распределение давления в расчетной области, но не позволяют снизить максимальное избыточное давление на стенах зданий застройки до безопасного уровня.

В качестве наиболее эффективных средств защиты сооружений от воздействия взрывной ударной волны могут быть рекомендованы использование отбойных стен в непосредственной близости от за-

стройки и удаление взрывоопасных объектов от зданий. При выборе размеров зон отчуждения следует учитывать трехмерный характер ударной волны с учетом существенного увеличения амплитуды избыточного давления вблизи зданий.

Выполнено численное моделирование взрыва облака газообразного водорода. Полученные результаты расчетов качественно отвечают ожидаемой физической картине и количественно могут быть использованы для прогноза возможных разрушений близлежащих строений.

Литература

1. Взрывные явления. Оценки и последствия: В 2-х кн. Пер. с англ. / У.Бейкер и др.; под ред. Я.Б. Зельдовича, Б.Е. Гельфанда. – М.: Мир, 1986. – 319 с.
2. Когарко С.М., Адушкин В.В., Лямин А.Г. Исследование сферической детонации газовых смесей // Научно-технические проблемы горения. – 1965. – № 2. – С. 22-34.
3. Борисов А.А., Гельфанд Б.Е., Цыганов С.А. О моделировании волн давления, образующихся при детонации и горении газовых смесей // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 2. – С. 163-165.
4. Парр-Сантос М.Т., Кастро-Руис Ф., Мендес-Буено Ц. Численное моделирование перехода горения в детонацию // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 2. – С. 108-115.
5. Шенг Дж. С. Обзор численных методов решения уравнений Навье-Стокса для течений сжимаемого газа // Аэрокосмическая техника. – 1986. – № 2. – С. 65-92.
6. Скоб Ю.А. Численное моделирование взрывов газо-воздушных смесей в атмосфере // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 3 (39). – С. 72-78.
7. Numerical Modeling of Hydrogen Release, Mixture and Dispersion in Atmosphere / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 1-st International Conference on Hydrogen Safety. – Pisa (Italy). – 2005. – 10 p. (ICHS Paper No. 110021).
8. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 448 с.
9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1976. – 400 с.
10. Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions / E.A. Granovskiy, V.A. Lyfar, Yu.A. Skob, M.L. Ugryumov // Abstracts Book and CD-ROM Proceedings of the 2-nd International Conference on Hydrogen Safety. – San Sebastian (Spain). – 2007. – 15 p. (ICHS Paper No. 1.3.52).
11. Safety and Security Analysis: 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.

Поступила в редакцию 24.01.2008

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.