

С.Б.Базаров, И.М.Набоко

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЗРЫВНОЙ ВОЛНЫ

Введение

Исследования проводились с целью получения данных, необходимых для прогнозирования особенностей возникновения взрывоопасных ситуаций в условиях образования больших реакционно-способных объемов водородно-воздушной смеси при аварийных утечках водорода на АЭС и объектах водородной энергетики, а также смеси углеводородов с воздухом на предприятиях добычи, переработки и использования углеводородных топлив. Для получения картины развития волнового процесса рассчитывается численно и сопоставляется с результатами соответствующих экспериментов распространение взрывной волны в нейтральной среде, как это было сделано ранее для кумулирующих объемов конусоидальной и пирамидальной геометрии [1-4].

Повышение достоверности прогнозирования является одной из главных проблем безопасности водородных систем при их использовании в транспортных средствах, силовых установках и энергоустановках, а также при эксплуатации атомных энергетических станций. При хранении и использовании водорода или его образовании в аварийных ситуациях (подобных тем, что развивались в марте 2011 года в Японии на АЭС «Фукусима» и ранее на Три-Майл-Айленд и в Чернобыле), его утечка и перемешивание с окружающим воздухом приводят к опасности возникновения горения и взрыва в замкнутых и загроможденных объемах.

Широко известны исследования процессов горения в режимах дефляции и детонации, но до настоящего времени существенно меньше изучены закономерности горения в наиболее опасных нестационарных режимах с максимальной нагрузкой в момент возникновения взрыва. В этих режимах характер разрушений и масштаб ущерба при одном и том же количестве воспламенившегося газа может меняться в десятки раз в зависимости от конкретных условий. Для достоверного прогноза степени безопасности технологических процессов в энергосистемах, использующих или допускающих образование взрывоопасных газовых смесей, необходимы исследования закономерностей и критических условий распространения и гашения пламени и детонационно-подобных волн в замкнутых объемах сложной геометрии.

Однако доступная в настоящее время степень формализации процесса распространения взрывной волны в реакционно-способном газе не дает оснований для построения убедительной модели численного исследова-

ния. Поэтому для построения наглядной картины возможного развития волнового процесса, предшествующего взрыву и во многом определяющую его возможность и интенсивность, целесообразно рассмотреть численно и сопоставить с результатами соответствующих экспериментов распространение взрывной волны в нейтральной среде. Полученные в результате подобных вычислительных экспериментов данные дают основания для оценок развития вторичного горения и взрывов в загазованных объёмах, результаты которых отражают особенности процессов, регистрируемых в физических экспериментах [5, 6].

Модель физического процесса

Рассматривается образование и распространение волн взрывного типа, то есть волн с короткой положительной фазой, в свободном пространстве [7-10]. Волны формируются в результате локального по времени и пространству выделения энергии, моделирующего режим конкретного физического эксперимента. Используется модель течения невязкого сжимаемого идеального нетеплопроводного газа. Решается задача о разлете небольшого объема газа с повышенными (относительно фоновых значений) параметрами в свободном пространстве.

Математическая модель и метод численного решения

Рассматривается течение идеального газа, описание которого проводится в переменных Эйлера. Нестационарные уравнения для случая осесимметричного течения берутся в виде следующей системы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u y) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v y) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u y) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho u^2 + p)y] + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u v y) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v y) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v y) + \frac{\partial}{\partial y}[(\rho v^2 + p)y] &= p, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho e y) + \frac{\partial}{\partial x}[(\rho e + p)u y] + \frac{\partial}{\partial y}[(\rho e + p)v y] &= 0. \end{aligned}$$

Здесь t – время, x, y – пространственные координаты (осевая и радиальная соответственно), u, v – компоненты вектора скорости $\mathbf{w}=(u, v)$ по x и y соответственно, ρ – плотность, p – давление, e – удельная полная энергия. Система замыкается уравнением состояния в виде: $p = (\gamma - 1)\rho(e - (u^2 + v^2)/2)$, где γ – показатель адиабаты газа.

Численное решение проводилось методом С.К.Годунова [11]. Заметим, что соответствующая разностная схема исследована на устойчивость для линейной системы с постоянными коэффициентами и линеаризованным уравнением состояния. При проведении расчёта шаг по времени выбирался равным $\Delta t = K \min(h_x, h_y) / \max_{i,j}(D_L, D_R)$, $i = 1, 2 \dots N_x$, $j = 1, 2 \dots N_y$, где h_x, h_y – шаги сетки по соответствующим пространственным координатам, N_x, N_y – число ячеек сетки по соответствующим координатам, D_L, D_R – скорости соответственно крайних левой и правой волн, образующихся при распаде разрыва на границе между расчетными ячейками, K – коэффициент запаса ($0 < K < 1$). Смысл этого коэффициента следующий: его увеличение “улучшает вид” получаемого численного решения (например, увеличивается крутизна профиля ударной волны). Но при приближении его к единице появляются неустойчивости численного решения, делающие невозможным дальнейший расчет.

Численное моделирование проводилось для безразмерных параметров, определяемых следующим образом (чертой сверху обозначены размерные величины): $p = \bar{p} / \bar{p}_0$, $\rho = \bar{\rho} / \bar{\rho}_0$, $x = \bar{x} / \bar{x}_0$, $u = \bar{u} / \sqrt{\bar{p}_0 / \bar{\rho}_0}$, $t = \bar{t} \sqrt{\bar{p}_0 / \bar{\rho}_0} / \bar{x}_0$. В качестве параметров обезразмеривания брались: $\bar{p}_0 = 101325 \text{ н/м}^2$, $\bar{\rho}_0 = 1.225 \text{ кг/м}^3$, $\bar{x}_0 = 1 \text{ м}$.

Условия физического эксперимента

Одной из целей работы являлось создание экспериментальной установки, позволяющей исследовать эволюцию сферического фронта пламени, распространяющегося в больших объемах, заполненных реакционно-способной газовой смесью. Одной из задач изучения горения газовых смесей в больших объемах является эволюция сферического пламени, распространяющегося в предварительно перемешанной газовой смеси. Данная фундаментальная проблема физической газодинамики и химической физики имеет большое практическое значение. Это связано с вопросами развития взрыва и интенсивного высокоскоростного сверхзвукового горения, а также выяснению условий возможности существования сферической самоподдерживающейся стационарной детонации Чепмена-Жуге.

Одним из основных вопросов здесь является процесс формирования интенсивной ударной волны перед ускоряющимся фронтом пламени. Поэтому возможности изучения условий образования и формы ударной вол-

ны перед фронтом сферического пламени было отведено особое внимание при создании установки и формировании диагностического комплекса.

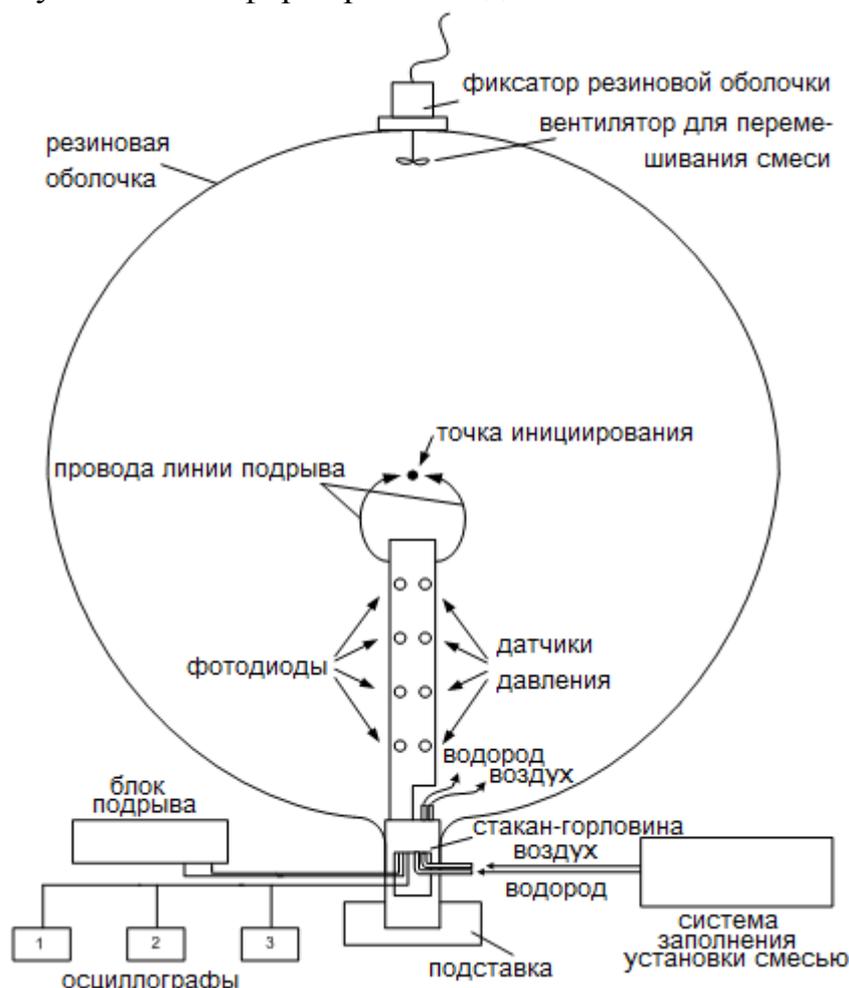


Рис.1. Схема экспериментальной установки для исследования сферического пламени и распространения взрывных волн в газовой среде.

Предполагается также изучение вопросов особенностей регулирования процессов горения, детонации и взрыва газовых смесей в больших объемах с помощью малых добавок химически активных веществ.

На данном этапе сформулирована программа исследований, определены методики измерений и создана аппаратура для исследования процессов взрыва и нестационарного горения газовых смесей. Проведена большая серия экспериментов.

В физическом эксперименте, результаты которого привлекаются для сравнения с представленными результатами расчетов, в большом объеме, заполненном воздухом при нормальных начальных условиях, взрывается заряд взрывчатого вещества, энергия которого составляет в первом случае 15 кДж и 2.3 кДж во втором. Объем камеры стенда «Сфера», на котором проводился эксперимент, составляет 900 м^3 . Давление, развивающееся во

взрывной волне – волне с короткой положительной фазой – измеряется четырьмя датчиками, расположенными на прямой на расстояниях 0.34 м, 0.674 м, 0.993 м и 1.313 м от точки инициирования.

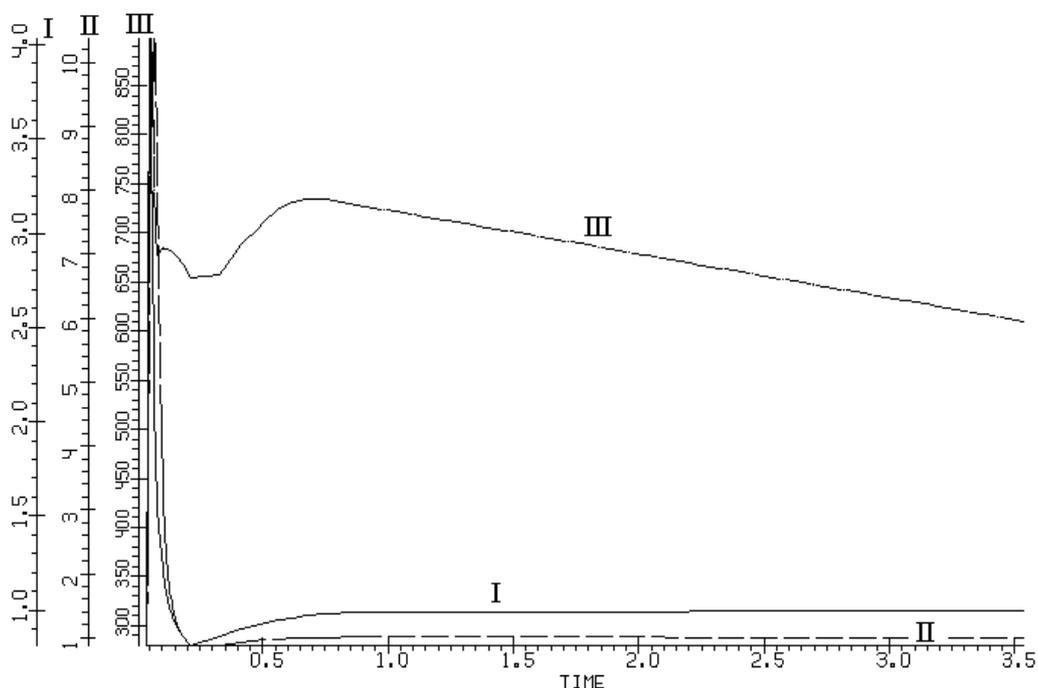


Рис.2. Изменение по времени давления (I), полного давления (II) и температуры (III) в первом (ближайшем к точке инициирования) датчике.

Схема созданной экспериментальной установки представлена на рис.1. В ней исследуемая горючая газовая смесь помещается в объем, ограниченный тонкой резиновой оболочкой. Перед экспериментом заполненный реакционно-способной смесью объем имеет сферическую форму и может содержать от 7 до 30 кубических метров исследуемой смеси. Инициирование смеси осуществляется в центре сферы. Предполагаемая энергия инициирования от 6 Дж до 20 кДж. Для фиксации движения фронта пламени установлены ионизационные датчики.

Особенностью рассматриваемого процесса является относительно малая интенсивность инициирующего заряда, для которой не известны решения, способные обеспечить достаточно достоверный прогноз изменения интенсивности волны конечной амплитуды по мере ее распространения, и которые могли бы быть привлечены к оценкам последствий возникновения такой волны в реакционно-способной среде [12]. Поэтому в качестве первого этапа численного моделирования задачи о взрыво- и пожароопасных последствиях возникновения и распространения слабых

волн – волн конечной амплитуды – в горючих смесях в представляемой статье рассматривается течение, реализующееся в нейтральной среде.

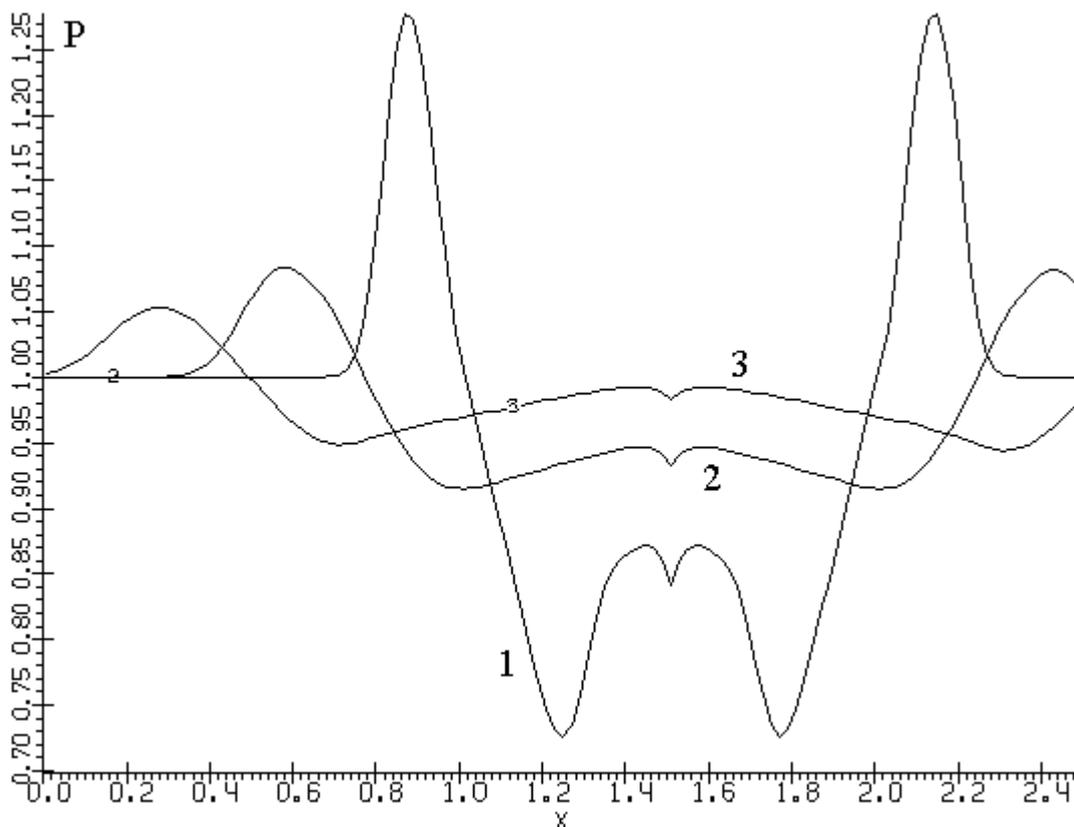


Рис.3. Распределение давления вдоль оси x на моменты времени 1 – 0.22, 2 – 0.48 и 3 – 0.74.

Сопоставление результатов с данными специально поставленных физических экспериментов (режимы которых приведены выше) позволит оценить оправданность выбора модели и используемого расчетного метода, а также должно показать значимость численного эксперимента для данного круга задач.

Результаты численного моделирования

Моделирование проводилось в расчётной области размером 2.5×2.0 безразмерных единиц, что позволяет избежать возможного влияния её границ на реализующееся течение. В точках с безразмерными координатами $(1.16, 0)$, $(0.826, 0)$, $(0.507, 0)$, $(0.187, 0)$, соответствующими положению датчиков в физическом эксперименте, осуществлялась запись параметров течения на каждом шаге по времени. В начальный момент времени во всем расчетном поле значения давления и плотности единичные, скорости нулевые, и в одной ячейке A с координатами $(x=1.5, y=0.0)$ задаются повышенные параметры (давление и плотность), обеспечивающие

совпадение показаний первого “численного” датчика с показаниями соответствующего экспериментального (рис.2).

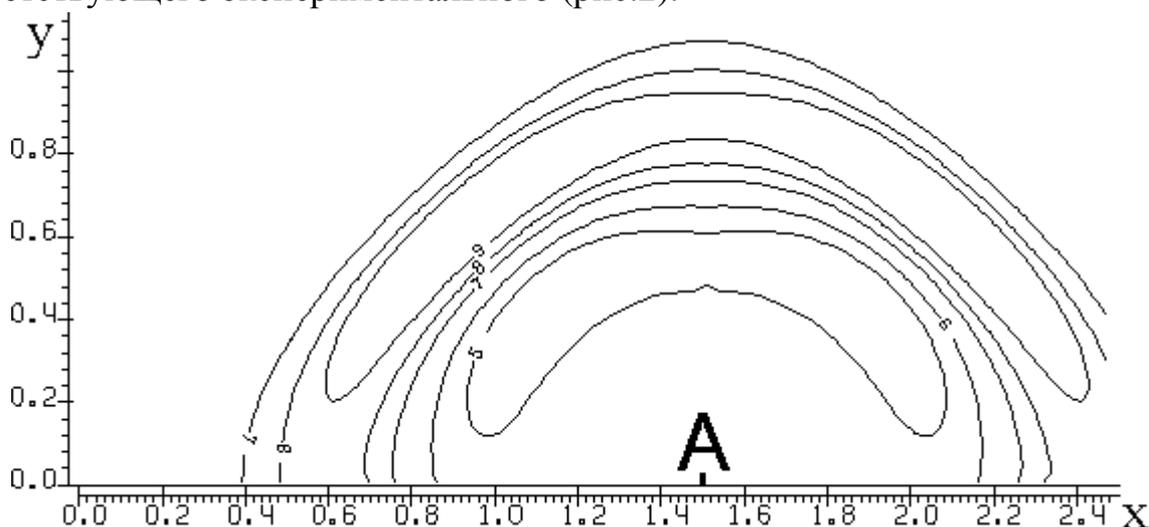


Рис.4. Изолинии давления в момент времени 0.48.

Следует отметить, что в отличие от характера изменения давления в датчике: резкий подъем, спад и далее незначительное возрастание и практически стационарное поведение, температура постоянно меняется по времени, причем не всегда монотонно.

График давления вдоль оси x (рис.3) позволяет увидеть, что распространяющаяся взрывная волна приводит к падению давления в окрестности точки инициирования и возникновению вторичной волны в области пониженного давления.

Представление о пространственном характере течения дают линии равного давления (рис.4).

Максимальное давление, зафиксированное датчиками, для случая энерговыделения 15 кДж (в ячейке А давление $p=5200$, плотность $\rho=520$):

Таблица 1

Номер датчика	1	2	3	4
Эксперимент	4	1.37	1.23	1.06
Расчет	4.03	1.21	1.06	1.04

Максимальное давление, зафиксированное датчиками, для случая энерговыделения 2.3 кДж (в ячейке А давление $p=1350$, плотность $\rho=135$):

Таблица 2

Номер датчика	1	2	3	4
Эксперимент	1.1	1.02	1.01	1.003
Расчет	1.1	1.015	1.008	1.001

Дальнейшим развитием процесса разлета ударно-нагретого газа является разрыв оболочки и распространение его внутри окружающей сферической оболочки большого (900 куб.м) объема с твердой поверхностью. Расширяющаяся сферическая волна отражается от этой поверхности, что приводит к образованию отраженной ударной волны (рис.5). Далее в замкнутом сферическом объеме реализуется многократное отражение и взаимодействие волн.

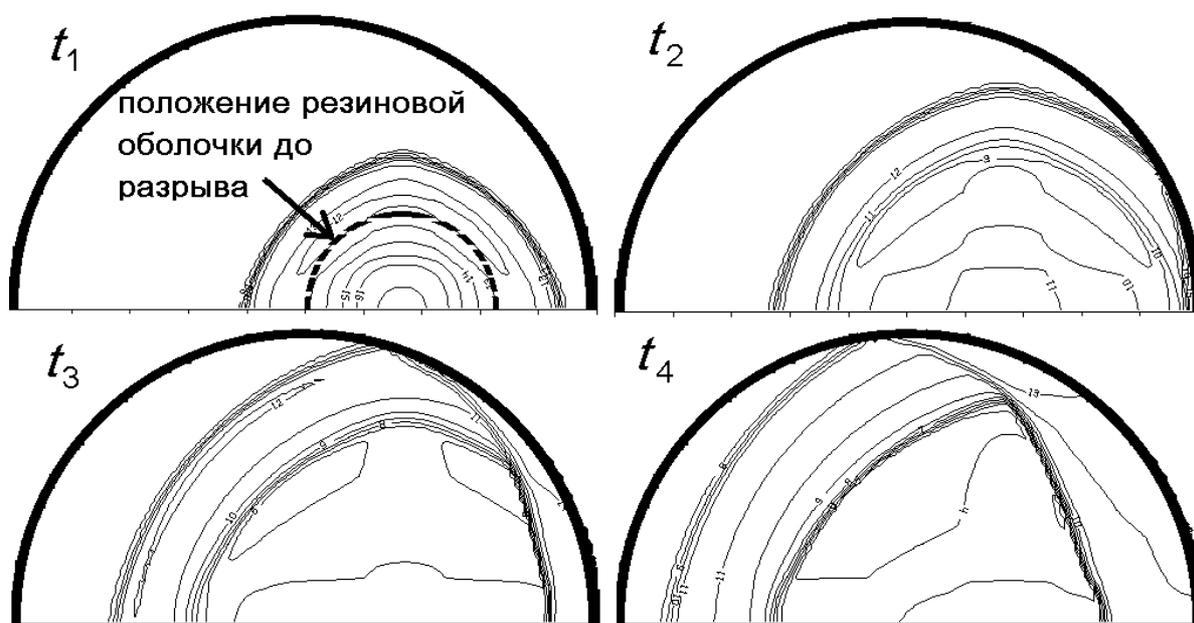


Рис.5. Распространение волн внутри окружающей сферической оболочки. Изолинии давления на четыре момента времени ($t_1 < t_2 < t_3 < t_4$).

Заключение

Проведенное моделирование показало, что используемая методика численного расчета пригодна для оценки параметров процесса быстрого выделения энергии в малой области и распространения возникающей в результате этого волны взрывного типа. Моделирование взрывов более мощных зарядов и, следовательно, формирование более интенсивных взрывных волн даст в расчёте более близкие к данным физического эксперимента результаты.

Литература

1. Базаров С.Б., Набоко И.М. Фокусировка взрывных волн: трехмерное математическое моделирование // Химическая физика. 2008. т.27. № 10. с.58-63.
2. Базаров С.Б., Набоко И.М. Взаимодействие волн с полостями // Математическое моделирование. 2002. т.14. № 9. с.34-40.
3. Petukhov V.A., Naboko I.M. and Fortov V.E. Explosion hazard of hydrogen-air mixtures in the large volumes // International Journal of Hydrogen Energy, V. 34, Issue 14, July 2009, pp.5924-5931.
4. Андрианов А.Н., Базаров С.Б., Бугеря А.Б., Колударов П.И., Набоко И.М. Фокусировка взрывных волн: моделирование на параллельных компьютерах // Химическая физика. 2006. т.25. № 11. с.53-58.
5. Набоко И.М., Бублик Н.П., Гусев П.А., Петухов В.А., Солнцев О.И. Горение и взрыв водородно-воздушной смеси в условиях, моделирующих элементы объемов загазованных помещений // Химическая физика. 2009. т.28. № 5. с. 25-33.
6. Petukhov V.A., Naboko I.M., Bublik N.P., Gusev P.A., Solntsev O.I., Gutkin L.D. Experimental modeling of blast wave propagation in hydrogen-air mixtures with variable composition // 33 International Symposium on Combustion, Tsinghua University, Beijing, China, 1-6 august 2010.
7. Садовский М.А. Механическое действие воздушных У.В. по данным экспериментальных исследований // Сборник «Физика взрыва». №1. М. АН СССР. 1952. с. 41.
8. Адушкин В.В. О формировании У.В. и разлете продуктов взрыва в воздухе // Прикладная механика и техническая физика. 1963. №5. с. 37.
9. А.В.Каширский, Ю.В.Коровин, Л.А.Чудов. Явный разностный метод для расчета двумерных нестационарных задач о движении продуктов детонации // Вычислительные методы и программирование. Вып. XIX. Изд. МГУ. 1972. с. 97-107.
10. Гриб А.А., Рыжов О.С., Христианович С.А. Теория коротких волн // Прикладная механика и техническая физика. 1960. №1. с. 65.
11. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва. Наука. 1976.
12. W.E.Baker, P.A.Cox, P.S.Westine, J.J.Kulesz, R.A.Strehlow. Explosion Hazards and Evaluation. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam — Oxford — New York. 1983.