

РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН, ОБРАЗОВАВШИХСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗРЫВА ВОЗДУШНО-ПРОПИЛЕНОВОЙ СМЕСИ, В Т-ОБРАЗНОМ КАНАЛЕ

Н.Н. Федорова¹, С.А. Вальгер^{1,2}, П.А. Фомин^{1,3}

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН
Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия*

²*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин), ул. Ленинградская, 113, Новосибирск, 630008, Россия*

³*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева
пр. Лаврентьева, 15, Новосибирск, 630090, Россия*

К числу важнейших задач обеспечения взрывобезопасности промышленной и жилой среды относится расчет параметров взрывной волны, образующейся при взрыве облака горючей смеси в пространстве сложной геометрии. Формирование подобных облаков происходит при аварийных утечках жидких или газообразных горючих веществ и их смешении с воздухом. В качестве примера можно привести катастрофу, которая имела место в г. Гаосюн, Тайвань в 2014 году [1]. В результате утечки жидкого пропилена из заглубленного продуктопровода, проходящего через центр города, произошло смешение испарившегося углеводорода с воздухом и распространение образовавшегося облака взрывчатой смеси по подземной дренажной системе. Последовавший взрыв унес жизни десятков людей и привел к масштабным разрушениям жилых и общественных зданий.

В работе представлены результаты расчетов ударно-волновых течений, образовавшихся в результате взрыва пробки воздушно-пропиленовой смеси в закрытом канале. Тестирование расчетной методики выполнено на задаче о взрыве сферического заряда конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Постановка тестовой задачи и начальные условия выбраны в соответствии с экспериментом [2] в масштабе 1:30. Геометрическая область представляет собой канал Т-образной формы, два выхода из которого закрыты, а третий граничит с внешней средой. Геометрия и размеры канала представлены на рис. 1,а, где $H=0.868$ м, $W=0.7$ м, $D=0.168$ м, $L_1=0.360$ м, $L_2=1.280$ м, $L_3=1.416$ м. Задача решалась в трехмерной постановке с учетом симметрии канала.

Расчеты проведены в программном комплексе ANSYS Fluent в невязкой (Модель 1), вязкой ламинарной (Модель 2) и турбулентной (Модель 3) постановках. В начальный момент времени труба и открытое пространство заполнены неподвижным воздухом при нормальных атмосферных условиях. Заряд конденсированного ВВ сферической формы массой $M=185$ г, что в полном масштабе соответствует 500-килограммовому заряду, находится в выходном сечении, граничащем с открытым пространством. На рис. 1,а показано положение трех датчиков L_1 , L_2 и L_3 , в которых в эксперименте [2] проводились измерения статического давления.

На границе внешней среды заданы нормальные атмосферные условия. При расчете на основе Модели 3 использованы 2 вида тепловых условий на стенках канала: адиабатической и холодной стенки. Взрыв моделируется путем добавления в уравнение энергии источникового члена [2], который работает на протяжении периода детонации заряда ВВ. В результате в канале формируется область с высоким давлением и температурой, которая приводит к образованию сильной ударной волны.

Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent. В результате получены записи давления в точках – мониторах $L_1 - L_3$, а также поля газодинамических параметров в расчетной области в различные моменты времени. Воздействие на стенки кана-

ла обусловлено прохождением первичной, самой мощной УВ и двух отраженных от закрытых концов канала волн меньшей амплитуды, а также зоны пониженного давления. На рис. 1,б показано мгновенное поле статической температуры в момент времени $t=2$ мс, полученное в расчетах по Модели 1. Сопоставление результаты расчетов с экспериментальными данными [2] по значениям пика давления и времени прихода ударной волны в датчики, приведенные в Таблице, показывают хорошее совпадение.

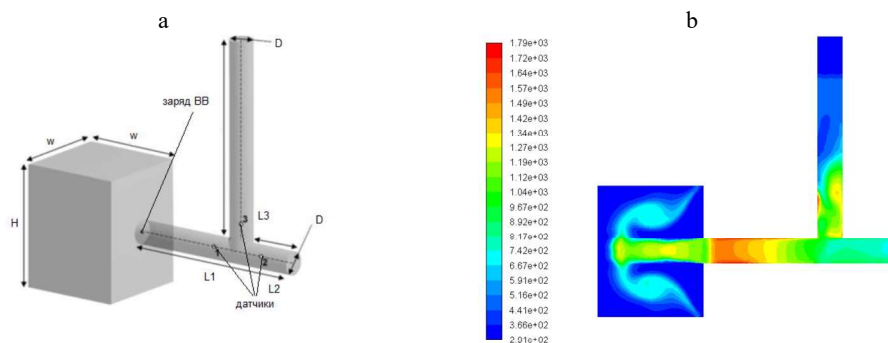


Рис. 1. Геометрия расчетной области (а) и мгновенное поле температуры в плоскости симметрии на момент времени $t = 2$ мс (б).

Таблица. Сравнение экспериментальных и расчетных данных о максимальных избыточных давлениях в точках-мониторах

Датчик	Избыточное давление, КПа					
	Эксперимент [1]	Расчет [1]	Модель 1	Модель 2	Модель 3, адиаб. стенка	Модель 3, хол. стенка
L1	1850	2009	1737	1732	1686	1671
L2	1050	1580	1162	1064	1056	1053
L3	465	465	520	496	490	490

На следующем этапе выполнено моделирование взрыва облака воздушно-пропиленовой смеси в этом же канале. Для описания процесса использована гипотеза бесконечной скорости химических реакций [3]. При этих предположениях газообразные продукты взрыва в каждый момент времени находятся в состоянии химического равновесия, которое сдвигается по мере изменения давления и температуры. По мере расширения продуктов взрыва и уменьшения температуры происходит рекомбинация продуктов реакции и тепловой эффект химической реакции максимален. Подробное описание методики можно найти в [4]. На основе анализа данные изучена структура нестационарного течения в канале, выход ударной волны (УВ) и горячей сверхзвуковой струи из канала в открытое пространство и выполнена оценка избыточного давления и импульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-58-53031 ГФЕН-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang H.-N., Chen J.-H., Chiu H.-J., Kao T.-J., Tsai H.-Y., Chen J.-R. Confined vapor explosion in Kaohsiung City – A detailed analysis of the tragedy in the harbor city // J. Loss Preven. Proc. Indust. 2016. Vol. 41, No. 5. P. 107-120.
2. Rigas F., Sklavounos S. Experimentally validated 3-D simulation of shock waves generated by dense explosives in confined complex geometries // Journal of Hazardous Materials. 2005. Vol. 121. P. 23-30.
3. Nikolaev Yu.A., Fomin P.A.. Analysis of equilibrium flows of chemically reacting gases // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1982. Vol. 18, No. 1. P. 53-58.
4. Valger S.A., Fomin P.A., Fedorova N.N. Numerical study of explosion of "propylene-air" mixture cloud in recessed cavity located near complex of bluff bodies // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering. Vol. 456, 012031.