

УДК 622.817.001.2

UDC 622.817.001.2

05.00.00 Технические науки

Technical Sciences

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ВЗРЫВОВ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ

A COMPUTER MODEL OF THE CONSEQUENCES OF AIR-FUEL MIXTURE EMERGENCY EXPLOSIONS

Орищенко Ирина Викторовна
кандидат технических наук
РИНЦ: SPIN-код: 1003-8910
OrishenkoIrina@mail.ru

Orishchenko Irina Victorovna
Candidate of Technical Sciences
SPIN-code: 1003-8910
OrishenkoIrina@mail.ru

Грачева Наталья Николаевна
кандидат технических наук
РИНЦ: SPIN-код: 4928-8945

Gracheva Natalia Nikolaevna
Candidate of Technical Sciences
SPIN-code: 4928-8945

Руденко Нелли Борисовна
кандидат технических наук
РИНЦ: SPIN-код: 4348-8168

Rudenko Nelly Borisovna
Candidate of Technical Sciences
SPIN-code: 4348-8168

Литвинов Владимир Николаевич
кандидат технических наук
РИНЦ: SPIN-код: 1021-5284

Litvinov Vladimir Nikolayevich
Candidate of Technical Sciences
SPIN-code: 1021-5284

Петренко Надежда Владимировна
кандидат технических наук
РИНЦ: SPIN-код: 5942-7170
*Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВПО ДГАУ в г. Зернограде, г. Зерноград,
Ростовская область, Россия*

Petrenko Nadezhda Vladimirovna
Candidate of Technical Sciences
SPIN-code: 5942-7170
*Azov-Black Sea Engineering Institute FSBEI HPE
Don State Agrarian University in Zernograd, Zerno-
grad, the Rostov region, Russia*

В статье рассмотрены основные причины взрывов ТВС и поражающие факторы, такие как: воздушная ударная волна, струи газов, осколки, высокая температура пламени, световое излучение и резкий звук. Приведена методика для расчета последствий аварийных выбросов, которая предназначена для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах ТВС, образующихся в атмосфере при промышленных авариях. Перечислены основные структурные элементы алгоритма расчетов. При рассмотрении предполагаются частичная разгерметизация или полное разрушение оборудования, содержащего горючее вещество в газообразной или жидкой фазе, выброс этого вещества в окружающую среду, образование облака ТВС, инициирование (зажигание) ТВС и взрывное превращение (дефлаграция или детонация) в облаке ТВС. Методика позволяет произвести приближенную оценку различных параметров воздушных ударных волн и определить вероятные степени поражения людей и повреждения зданий при авариях с взрывами облаков ТВС. Данная методика реализована на языке C# в интегрированной среде разработки программного обеспечения Microsoft VisualStudio 2010. Приведен фрагмент программы, в которой описан расчет безразмерного давления P_x и

In this article the basic principles of air-fuel mixture explosions and striking factors, such as air-striking wave, gas streams, splinters, flame heat, light radiation and sharp sounds are observed. The calculation technique of the emergency emission consequences which is for a quantitative estimation of air-striking wave parameters at air-fuel mixture explosions forming in the atmosphere at industrial failures is given. The basic structural elements of calculation algorithm are listed. It is supposed partial depressurization or full destruction of the equipment containing combustible substance in a gaseous or liquid phase, the emission of this substance in the atmosphere, the air-fuel mixture cloud formation, the air-fuel mixture initiation (ignition) and the explosive transformation (deflagration or detonation) in the air-fuel mixture cloud. The technique allows making the approached estimation of air-striking wave various parameters and defining the probable degrees of men defeat and building damage at failures with air-fuel mixture cloud explosions. The given technique is developed in C# language in the integrated environment of software Microsoft VisualStudio 2010 working out. The program fragment in which the calculation of dimensionless P_x pressure and dimensionless I_x impulse is given

безразмерного импульса I_x

Ключевые слова: БЕЗОПАСНОСТЬ, ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ, ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНЫЕ СМЕСИ, АВАРИЯ, УДАРНАЯ ВОЛНА, УЩЕРБ

Keywords: SAFETY, BURNING, EXPLOSION, AIR-FUEL MIXTURE, FAILURE, STRIKING WAVE, DAMAGE

На современном этапе промышленного производства весьма актуальной задачей становятся обеспечение безопасности персонала и снижение материального ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций как природного, так и техногенного характера. При этом около 80% от числа всех техногенных чрезвычайных ситуаций приходится на долю пожаров и взрывов.

С каждым годом объем производства и потребления пожароопасных веществ и материалов увеличивается, поэтому знание свойств этих веществ и материалов, правильная оценка их пожароопасности, количественная оценка способов предотвращения их горения являются обязательными условиями, которые необходимы для разработки правильных инженерных решений по надежной противопожарной защите производственных объектов и тушению возникших на них пожаров.

Решение научных и технических проблем по обеспечению пожаро-взрывобезопасности различных объектов в современных условиях является весьма актуальным в связи с увеличением числа аварий, пожаров, стихийных бедствий, террористических актов и других подобных явлений. Представляется очевидным, что для успешного решения этих сложных проблем необходимо наряду с принятием мер административного, экономического, юридического характера и проведением других мероприятий, расширять систему научных представлений, в частности, о механизмах воздействия и развития процессов горения и проведения расчетов горения на разных его стадиях.

Взрыв топливно-воздушных смесей (ТВС) относится к классу химических взрывов и представляет серьёзную опасность для населения и пер-

сонала опасного объекта [1, 2]. Взрыв ТВС возникает при утечке газа либо испарении горючих жидкостей в ограниченных пространствах (помещениях), где быстро накапливается концентрация горючих элементов до предельной, при которой может произойти воспламенение облака. Взрывы ТВС могут происходить в [3, 4]:

- помещениях вследствие утечки газов из бытовых приборов;
- ёмкостях их хранения и транспортировки (спецрезервуарах, газгольдерах, цистернах, танках – грузовых отсеках танкеров);
- глубинных горных выработках;
- природной среде вследствие повреждений трубопроводов, труб буровых скважин, при интенсивных утечках сжиженных и горючих газов.

Взрыв неограниченного облака ТВС может произойти в результате редкого стечения обстоятельств. Во-первых, необходим массовый выброс горючего, например, углеводорода, либо в атмосферу, либо у поверхности земли. Подобное событие возможно на химическом предприятии, при перевозке горючего, а также при аварии на газопроводе. После выброса горючего в атмосферу, развитие явления может пойти по четырем направлениям [5]:

- выброшенное горючее рассеивается без воспламенения;
- горючее загорается во время выброса, как правило, в этом случае инцидент завершается пожаром без взрыва;
- выброшенное горючее рассеивается на большой площади без значительного перемешивания с воздухом, после некоторой задержки облако воспламеняется и происходит массовый пожар;
- последовательность событий такая же, как и в предыдущем случае, но из-за перемешивания с воздухом пламя ускоряется и образуется опасная взрывная волна.

Взрывы неограниченных паровых облаков могут быть чрезвычайно опасными. Это происходит по той причине, что при большой утечке в атмосферу энергоносителя в определенных метеорологических условиях могут образоваться действительно огромные облака горючей смеси. В качестве грубого приближения для оценки разрушений при взрывах неограниченных облаков можно принимать от 2% до 10% теплоты сгорания всего пролитого горючего.

Характерной особенностью взрыва является его быстротечность. Время взрыва исчисляется тысячными долями секунды. Температура достигает десятков тысяч градусов по Цельсию. Взрывные газы сохраняют свое разрушительное воздействие на определенном расстоянии.

Последствия взрывов зависят от мощности и среды, в которой происходит взрыв.

Поражающие факторы взрыва: воздушная ударная волна, струи газов, осколки, высокая температура пламени, световое излучение, резкий звук.

Основными поражающими факторами при воздействии ударной волны на объекты являются: избыточное давление фазы сжатия во фронте ударной волны, лобовое давление, избыточное давление отражения.

Поражающими факторами взрыва ТВС для человека являются: избыточное давление фазы сжатия во фронте ударной волны; импульс фазы сжатия во фронте ударной волны, осколочное действие; термическое воздействие.

Поражение людей происходит как при непосредственном (прямом) воздействии воздушной ударной волны, так и косвенным путем.

При непосредственном воздействии ударной волны основной причиной появления травм у людей является мгновенное повышение давления воздуха, что воспринимается человеком как резкий удар (обжигание человека). При этом возможны повреждения внутренних органов, разрыв крове-

носных сосудов, барабанных перепонок, сотрясение мозга, различные переломы и т.д. Кроме того, скоростной напор воздуха, обуславливающий метательное действие ударной волны, может отбросить человека на значительное расстояние и причинить ему при ударе о землю (или препятствия) различные повреждения.

Характер и тяжесть поражения людей зависят от значений параметров ударной волны, положения человека в момент взрыва и степени его защищенности. При прочих равных условиях наиболее тяжелые поражения получают люди, находящиеся в момент прихода ударной волны вне укрытий в положении стоя. В этом случае площадь воздействия скоростного напора воздуха будет примерно в шесть раз больше, чем в положении человека лежа.

Поражения, возникающие под воздействием ударной волны, подразделяются на легкие, средние, тяжелые и крайне тяжелые (смертельные).

Кроме непосредственного поражения ударной волной люди и животные могут получить от нее косвенные (различные травмы вплоть до смертельной). Они проявляются в поражение людей летящими обломками зданий и сооружений, камнями, деревьями, битым стеклом и другими предметами, увлекаемыми ею, а также при нахождении людей в разрушающихся зданиях.

Прогноз взрывов ТВС осуществляется в соответствии со следующими методическими рекомендациями:

- РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей» [1];
- ГОСТ 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов»;
- ПБ 09-540-03 «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» и др.

Анализ и оценка опасностей возможных аварий в результате образования пожаро- и взрывоопасной смеси на потенциально опасных производственных объектах техносферы – является одной из ключевых проблем промышленной безопасности.

В настоящее время существует большое количество методик для расчета последствий аварийных выбросов пожаровзрывоопасных веществ. В нашей стране гауссовские методики реализованы, интегральные методы – в ГОСТе, а методы, основанные на решении уравнений в частных производных, в программных продуктах CFD.

Описанная ниже методика позволяет произвести приближенную оценку различных параметров воздушных ударных волн и определить вероятные степени поражения людей и повреждения зданий при авариях с взрывами облаков ТВС.

Методику рекомендуется использовать:

- при определении масштабов последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей;
- при разработке и экспертизе деклараций безопасности опасных производственных объектов.

Методика предназначена для количественной оценки параметров воздушных ударных волн при взрывах ТВС, образующихся в атмосфере при промышленных авариях. При рассмотрении предполагаются частичная разгерметизация или полное разрушение оборудования, содержащего горючее вещество в газообразной или жидкой фазе, выброс этого вещества в окружающую среду, образование облака ТВС, инициирование (зажигание) ТВС, взрывное превращение (дефлаграция или детонация) в облаке ТВС.

Методика позволяет определять вероятные степени поражения людей и повреждений зданий от взрывной нагрузки при авариях со взрывами ТВС.

Предполагается, что в образовании облака ТВС участвует горючее вещество одного вида. В противном случае (для смеси нескольких горючих веществ) характеристики ТВС, используемые при расчетах параметров ударных волн, определяются отдельно.

Основными структурными элементами алгоритма расчетов являются:

1. Выбор степени чувствительности горючего вещества и класса горючего вещества.
2. Расчет стехиометрической концентрации горючего вещества в ТВС.
3. Расчет удельной низшей теплоты сгорания горючего вещества.
4. Расчет эффективного энергозапаса облака ТВС.
5. Выбор типа взрывного превращения облака ТВС и вычисление скорости фронта пламени.
6. Вычисление эффективного энергозапаса облака ТВС.
7. Вычисление безразмерного расстояния.
8. Расчет безразмерного давления и безразмерного импульса.
9. Расчет размерных величин давления и импульса фазы сжатия.
10. Оценка поражающего воздействия:
 - вероятность полных и сильных разрушений промышленных зданий;
 - вероятность средних разрушений промышленных зданий;
 - вероятность слабых разрушений промышленных зданий;
 - оценка вероятности поражения людей: вероятность гибели от баротравмы;
 - оценка вероятности поражения людей: разрыв барабанных перепонок.
11. Выбор вероятности ущерба по пробит-функции.

Методика расчета поражающего воздействия аварийных взрывов ТВС была реализована на языке C# в интегрированной среде разработки программного обеспечения Microsoft Visual Studio 2010 [6, 7]. Ниже приведен фрагмент программы, в котором описан расчет безразмерного давления P_x и безразмерного импульса I_x .

```
double Px = 0;
```

```
double Ix = 0;
```

```
double Px1 = 0;
```

```
double Ix1 = 0;
```

```
double Px2 = 0;
```

```
double Ix2 = 0;
```

```
    Px2 = Math.Exp(-1.124 - 1.66 * Math.Log(Rx) + 0.26 *  
    Math.Pow(Math.Log(Rx), 2));
```

```
    Ix2 = Math.Exp(-3.4217 - 0.898 * Math.Log(Rx) - 0.009 *  
    Math.Pow(Math.Log(Rx), 2));
```

```
    if (Rvp == "детонация")
```

```
    {
```

```
        {
```

```
            {
```

```
                if (tip == "газовая")
```

```
                    {
```

```
                        if (Rx <= 0.2)
```

```
                            {
```

```
                                Px = 18; Ix = 0.182;
```

```
                                    }
```

```
                                else if (Rx > 0.2 && Rx < 24)
```

```
                                    {
```

```
                                        Px = Math.Exp(-1.124 - 1.66 * Math.Log(Rx) + 0.26 *  
                                        Math.Pow(Math.Log(Rx), 2));
```

```
                                        Ix = Math.Exp(-3.4217 - 0.898 * Math.Log(Rx) - 0.009 *  
                                        Math.Pow(Math.Log(Rx), 2));
```

```
                                            Ix2 = Math.Exp(-3.4217 - 0.898 * Math.Log(Rx) - 0.009 *  
                                            Math.Pow(Math.Log(Rx), 2));
```

```
                                            }
```

```
        }
    }
else
    {
if (Rx <= 0.25)
    {
Px = 18; Ix = 0.16;
    }
else
    {
Px = 0.125 / Rx + 0.137 / Math.Pow(Rx, 2) + 0.023 / Math.Pow(Rx, 3);
    Ix = 0.022 / Rx;
    }
    }
}
else
    {
if (tip == "газовая")
    {
if (Rx <= 0.34)
    {
Px1 = 1.06 * Math.Pow(vr / 340, 2);
Ix1 = 0.17 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (1 - vr / 992);
    }
else
    {
Px1 = 0.86 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (0.83 / Rx - 0.14 /
Math.Pow(Rx, 2));
```

```

        Ix1 = 0.86 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (1 - vr / 992) * (0.06 / Rx +
0.01 / Math.Pow(Rx, 2) + 0.0025 / Math.Pow(Rx, 3));
    }
}
else
    {
if (Rx <= 0.34)
    {
        Px1 = 0.92 * Math.Pow(vr / 340, 2);
        Ix1 = 0.15 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (1 - vr / 1133);
    }
else
    {
        Px1 = 0.75 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (0.83 / Rx - 0.14 /
Math.Pow(Rx, 2));
        Ix1 = 0.75 * Math.Pow(vr / 340, 2) * (1 - vr / 1133) * (0.06 / Rx
+ 0.01 / Math.Pow(Rx, 2) + 0 / 0025 / Math.Pow(Rx, 3));
    }
}
Px = Math.Min(Px1, Px2);
Ix = Math.Min(Ix1, Ix2);
}

```

В результате выполнения программы на экране появляется форма для ввода исходных данных. В текстовые поля формы вводятся соответствующие значения (рис. 1).

Название горючего вещества:	бутан
Масса горючего вещества в облаке ТВС:	15000
Средняя концентрация горючего вещества в облаке ТВС:	95
Тип облака ТВС:	гетерогенная
Класс окружающего пространства:	1
Расстояние от эпицентра взрыва:	230
Стехиометрический коэффициент перед горючим веществом:	1,04
Молярная масса горючего вещества:	58

ВЫЧИСЛИТЬ

Рисунок 1 – Форма для ввода исходных данных

После щелчка по кнопке «вычислить» на экране появляется другая форма с результатами расчета (рис. 2).

Тип ущерба	Доля ущерба, %
Полные и сильные разрушения	30
Средние разрушения	87
Слабые разрушения	100
Гибель людей от баротравмы	0
Разрыв барабанных перепонок	2

Рисунок 2 – Результаты вычислений

Оценка доли общих, безвозвратных и санитарных потерь на заданном удалении от эпицентра взрыва:

доля безвозвратных потерь – доля погибших, т. е. $N_{\text{безв}} = 0\%$;

доля санитарных потерь – доля пострадавших, т. е. $N_{\text{сан}} = 2\%$;

доля общих потерь в данном случае численно равна доле пострадавших, так как у людей, погибших от баротравмы, также будет

наблюдаться разрыв барабанных перепонок, т.е. $N_{\text{общ}} = N_{\text{сан}} = 2\%$.

Данную программу предлагается использовать для оценки последствий аварийных взрывов топливовоздушных смесей на пожароопасных объектах.

Литература

1. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями). РД 03-409-01 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_93563.html.
2. Поражающие факторы ядерного взрыва [Электронный ресурс]. – URL: http://knowledge.allbest.ru/war/2c0b65635a2bc78a4d53a88421216d37_0.html.
3. Балаганский, И.А. Природные и техногенные катастрофы: учебное пособие [Электронный ресурс] / И.А. Балаганский. – Новосибирск, 2003. – 55 с. – URL: http://geo.tsu.ru/faculty/structure/chair/geography/Magist/catastrophies_5043.pdf.
4. Липкович, И.Э. Теория горения и взрыва: учебное пособие для практических занятий / И.Э. Липкович, Н.В. Петренко, И.В. Орищенко. – зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2014. – 121 с.
5. Кукин, П.П. Теория горения и взрыва: учебное пособие / П.П. Кукин, В.В. Юшин, С.Г. Емельянов. – Москва: Изд-во Юрайт, 2012. – 435 с.
6. Свидетельство № 2015610932 о государственной регистрации программы для ЭВМ «Оценка последствий аварийных взрывов тепловоздушных смесей»
7. Стиллмен, Э. Изучаем С# / Э. Стиллмен, Дж. Грин. – СПб: Питер, 2012.

References

1. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej (s izmenenijami i dopolnenijami). RD 03-409-01 [Jelektronnyj resurs]. – URL: http://www.businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_93563.html.
2. Porazhajushhie faktory jadernogo vzryva [Jelektronnyj resurs]. – URL: http://knowledge.allbest.ru/war/2c0b65635a2bc78a4d53a88421216d37_0.html.
3. Balaganskij, I.A. Prirodnye i tehnogennye katastrofy: uchebnoe posobie [Jelektronnyj resurs] / I.A. Balaganskij. – Novosibirsk, 2003. – 55 s. – URL: http://geo.tsu.ru/faculty/structure/chair/geography/Magist/catastrophies_5043.pdf.
4. Lipkovich, I.Je. Teorija gorenija i vzryva: uchebnoe posobie dlja praktičeskix zanjatij / I.Je. Lipkovich, N.V. Petrenko, I.V. Orishhenko. – Zernograd: FGBOU VPO AChGAA, 2014. – 121 s.
5. Kukin, P.P. Teorija gorenija i vzryva: uchebnoe posobie / P.P. Kukin, V.V. Jushin, S.G. Emel'janov. – Moskva: Izd-vo Jurajt, 2012. – 435 s.
6. Svidetel'stvo № 2015610932 o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM «Ocenka posledstvij avarijnyh vzryvov teplovozdushnyh smesej»
7. Stillmen, Je. Izuchaem C# / Je. Stillmen, Dzh. Grin. – SPb: Piter, 2012.