

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ АВАРИЯХ НА ПРОМПЛОЩАДКАХ

Предложены метод расчета теплового загрязнения воздушной среды и поражения людей при горении огненного шара. Метод основан на численном интегрировании трехмерного уравнения энергии. Приводятся результаты численного эксперимента.

Запропонован метод розрахунку теплового забруднення повітря та враження людей після горіння вогненої кулі. Метод базується на чисельному інтегруванні тривимірного рівняння енергії. Наводяться результати чисельного експерименту.

The method to calculate the thermo pollution and damage of people when the fire ball was burning was developed. The method is based on numerical integration of 3D equation of energy. The results of numerical experiments are presented.

В настоящее время повышенный интерес привлекает к себе задачи, связанные с выбросом или разливом ряда химических веществ (например, углеводородов), при котором образуется облако газа паровоздушной смеси (ГПВС). Если это облако переобогащено топливом, то происходит горение его с образованием огненного шара [1]. В этом случае будет происходить термическое воздействие на обслуживающий персонал, который располагается возле места аварии. Поражение людей может происходить за счет вдыхания горячего воздуха (поражение органов дыхания), а так же за счет контакта горячего воздуха с телом человека (ожоги различной степени тяжести). В этой связи является важным прогноз риска термического поражения людей с целью определения уровня экологической безопасности на промышленном объекте (аварии на транспорте и т. п.). Анализ литературных источников показал, что вопрос прогноза риска термического поражения людей при образовании огненного шара и миграции нагретого воздуха в атмосфере в литературе практически не рассматривались. Рассматривались лишь вопросы термического поражения при излучении огненного шара [1]. Важным вопросом является исследование возможного поражения персонала на промплощадке при миграции огненного шара. Это приобретает в настоящее время особую актуальность в связи со значительным износом технологического оборудования на многих производствах. **Целью** настоящей работы является создание численной модели и разработка на их основе метода расчета теплового загрязнения воздушной среды и термического поражения людей при образовании огненного шара.

Постановка задачи, математическая модель

Рассмотрим область, имеющую размеры

R_x, R_y, R_z . Пусть в результате аварии произошло быстрое горение углеводородов (или других веществ), в результате которого образовалась подзона с высокой температурой T_0 – огненный шар. В данной работе принимается, что шар имеет характерный диаметр D в момент времени $t = 0$. Далее рассматривается миграция этой подзоны в атмосфере при воздействии воздушного потока – ветра (рис. 1). Рядом с местом аварии находится персонал (на рис. 1 местонахождение персонала показано позицией 2), который начинает убежать по маршруту, который показан штриховой линией на рис. 1. Требуется рассчитать динамику теплового загрязнения воздушной среды и риск термического поражения персонала, убегающего с места аварии.

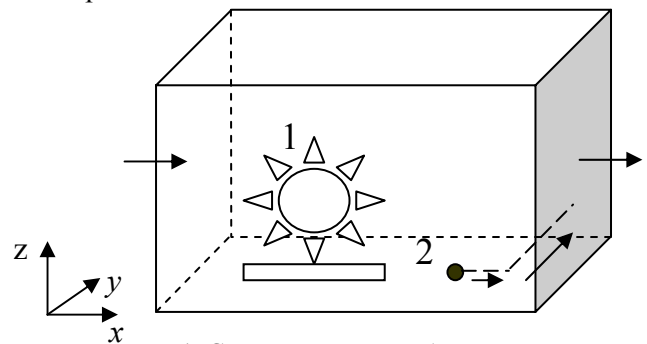


Рис. 1. Схема расчетной области:
1 – огненный шар; 2 – положение человека

Для моделирования теплового загрязнения воздушной среды будем использовать трехмерное уравнение энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(a_z \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где T – температура, α – коэффициент температуропроводности, u, v, w – компоненты скорости воздушной среды.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [4].

Согласно методики компании DOW Chemikal [1] радиус огненного шара R_0 и время его существования рассчитываются так:

$$R_0 = 29 \cdot M^{1/3}, \text{ м};$$

$$t_s = 4,5 \cdot M^{1/3}, \text{ с},$$

где M – половина вместимости емкости тонн.

Термическое поражение людей может быть оценено по величине теплового потока, падающего на человека. В этом случае будут поражены кожные покровы и человек получит ожоги различной степени тяжести. Термическое поражение будет происходить за счет теплового излучения и за счет конвективной теплоотдачи. На промышленной площадке могут находиться различные объекты, которые в первые секунды горения огненного шара могут выполнить роль экранов, защищающих людей от теплового излучения. Поэтому несомненный интерес представляет прогнозирование термического поражения при конвективной теплоотдачи, т. е. при соприкосновении горячего воздуха с телом человека. Интенсивность поражения людей при тепловом излучении огненного шара может быть рассчитана по методике, приведенной в работе [1]. В данной работе рассматривается термическое поражение людей в результате контакта горячего воздуха с телом человека (т.е. при конвективной теплоотдачи). Величина теплового потока рассчитывается по формуле Ньютона–Рихмана.

$$q = h_c (T_a - T_b),$$

где T_a – температура воздуха на месте нахождения человека;

T_b – температура тела человека;

h_c – коэффициент конвективной теплоотдачи.

Сопоставляя данную величину q с пороговым значением (например, при $q = 210...336$ кДж/м² – ожоги 2-ой степени) [1] можно прогнозировать риск термического поражения людей на промплощадке при горении огненного шара. Однако необходимо отметить, что расчет величины q при эвакуации людей является сложной задачей, т. к., с одной стороны, происходит миграция горячего воздуха под действием ветра, а с другой стороны – изменяется местоположение людей, убегающих от места аварии.

Поражение людей может наступить также в результате вдыхания горячего воздуха. Степень поражения органов дыхания в этом случае зависит от температуры воздуха и времени нахождения

человека при такой температуре. Поэтому риск термического поражения людей может быть рассчитан по величине времени пребывания людей в зоне с повышенной температурой. Если проанализировать данные о термическом поражении людей (ожог 2 степени), находящихся в зоне с повышенной температурой (более 71 °С), представленные в работе [5] и ввести, по аналогии с химическим поражением человека, параметр тепловой дозы $Th D$

$$Th D = \int_0^t T dt,$$

где T – температура на месте нахождения человека (°С);

t – время экспозиции (с).

Термическое поражение (ожог 2-й степени) наступит при величине тепловой дозы равной $Th D = 1100...1500$ °С·с (при $T > 71$ °С).

В разработанной модели риск термического поражения людей при горении огненного шара оценивается как по величине тепловой дозы, так и по величине теплового потока при конвективной теплоотдачи.

Метод решения

Для численного интегрирования уравнения (1), используется попеременно-треугольная неявная разностная схема [3]. Каждое разностное уравнение представляет собой запись балансового соотношения для контрольного объема (разностной ячейки). Расчет неизвестного значения определяется на каждом шаге расщепления по явной формуле бегущего счета.

Практическая реализация модели

На базе разработанной численной модели создан пакет прикладных программ «Thermo-3» Пакет программ реализован на алгоритмическом языке FORTRAN-IV. Рассмотрим практическое использование данного пакета на примере решения прикладной задачи.

Путь на месте аварии образовался огненный шар, имеющий диаметр 30 м и температуру 1300 °С. Размеры расчетной области 120×120×60 м; скорость ветра 7,5 м/с. В момент аварии обслуживающий персонал находится на расстоянии 30 м от огненного шара и начинает убежать со скоростью 3 м/с; $h \cdot c = 1700$ Вт·м²/с [4].

Ставится задача исследования теплового загрязнения воздушной среды после аварии и прогнозирования риска термического поражения людей на маршруте эвакуации (рис. 1).

На рис. 2...5 представлена динамика формирования зоны теплового загрязнения при миграции огненного шара. Хорошо видно, что с течением времени начальная форма шара изменяется и зона теплового загрязнения быстро

вытягивается в направлении движения воздушного потока.

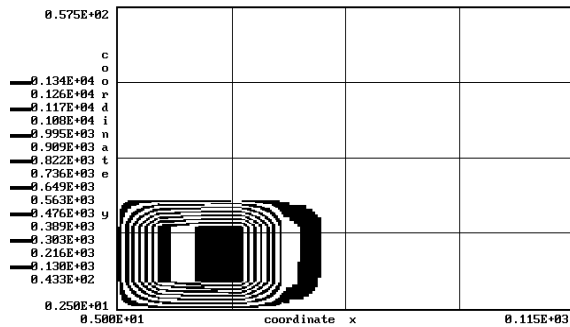


Рис. 2. Распределение изотерм, $t = 0, 2$ с после аварии

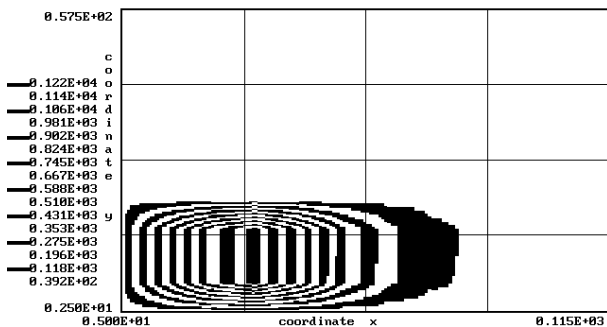


Рис. 3 Распределение изотерм, $t = 1, 5$ с после аварии

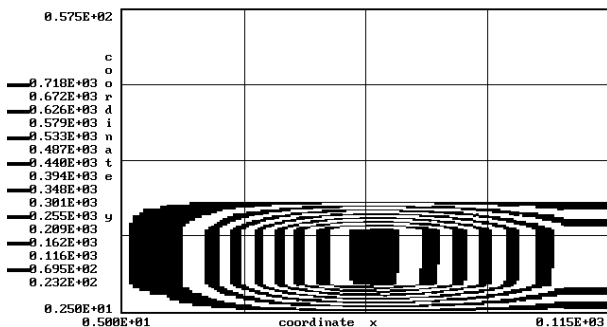


Рис. 4. Распределение изотерм, $t = 5, 6$ с после аварии

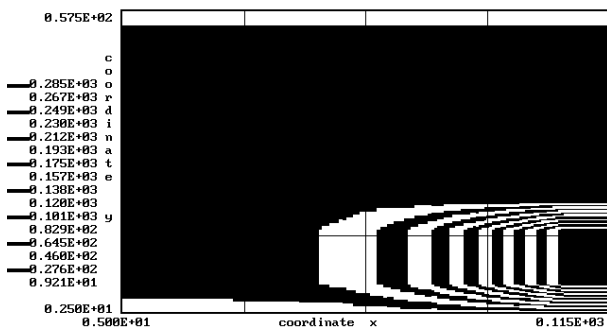


Рис. 5 Распределение изотерм, $t = 16$ с после аварии

В табл. 1 представлены результаты расчета величины теплового потока, падающего на бегущего человека. В этой таблице также представлены данные о температуре воздуха на

месте нахождения человека. Как видно, люди уже через 12 секунд после аварии получают ожоги несовместимые с жизнью.

Таблица 1

Расчетные значения теплового потока, попавшего на человека и температуры воздуха на месте расположения персонала

Ниже представлены данные о величине тепловой дозы, позволяющие прогнозировать риск термического поражения людей в случае рассмотренного сценария аварии:

| Время после аварии, с | Тепловой поток, кДж/м ² | Температура, °С |
|-----------------------|------------------------------------|-----------------|
| 3 | 79 | 470 |
| 6 | 389 | 622 |
| 12 | 897 | 448 |

$t = 3$ с $Th D = 571$ °С·с;

$t = 6$ с $Th D = 2506$ °С·с;

$t = 9$ с $Th D = 4299$ °С·с;

$t = 12$ с $Th D = 5714$ °С·с.

Из данной таблицы также видно, что через 6 секунд после аварии люди получают смертельное поражение органов дыхания.

Выводы

В работе построена компьютерная модель и на ее основе разработан метод расчета термического поражения людей. Модель основана на численном интегрировании трехмерного уравнения энергии. Модель позволяет быстро выполнить прогноз риска поражения людей находящихся вблизи места аварии.

Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для моделирования теплового загрязнения воздушной среды с учетом зданий на промплощадке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Учеб. пособ. в 5-ти книгах / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаяева. - М.: АСВ, 2001. - 200 с.
2. Демидов П. Г. Горение и свойства горючих веществ. М : Изд-во МКХ РСФСР, 1962. – 254 с.
3. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей сред: Наук. Думка / В. В. Скопецкий, К. Хрущ , Н. Н.Беляев. – К, 1997. – 368 с.
4. Крейт Ф. Основы теплопередачи. / Ф. Крейт, У. Блэк. – М. : Мир, 1983. – 512 с.
5. Кулешов М. М. Пожежна безпека будівель та споруд: Навч. посіб. / М. М. Кулешов, Ю. В. Уваров, О. Л. Олійник, В. П. Пустомельник, А. С. Беліков – Х, 2004 – 271 с.

Поступила в редакцию 30.10.2007.