

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ АВАРИЯХ

Запропоновано метод розрахунку теплового забруднення повітря вентиляції після горіння вогненної кулі. Метод базується на чисельному інтегруванні тривимірного рівняння енергії. Поле швидкості повітря розраховується на базі чисельного інтегрування тривимірного рівняння потенційного руху. Наводяться результати чисельного експерименту.

Предложен метод расчета теплового загрязнения воздушной среды при горении огненного шара. Метод основан на численном интегрировании трехмерного уравнения энергии. Поле скорости воздушного потока рассчитывается путем численно интегрирования трехмерного уравнения потенциального течения. Приводятся результаты численного эксперимента.

The method to calculate the thermopollution when the fire ball was burning was developed. The method is based on numerical integration of 3D equation of energy. Velocity field is calculated using 3D model of potential flow. The results of numerical experiment are presented.

В настоящее время повышенный интерес привлекают к себе задачи, связанные с термическим поражением людей при горении огненного шара. В научной литературе приводится описание методик, с помощью которых можно рассчитать термическое поражение людей или объектов при тепловом излучении. Менее изученным является вопрос термического поражения людей при их контакте с горячим воздухом, который движется от огненного шара под действием конвекции [1].

Целью настоящей работы является создание численной модели теплового загрязнения воздушной среды на промышленных площадках при горении огненного шара с целью прогноза термического поражения людей на промплощадке. Предлагаемая модель позволяет учесть в процессе расчета основные физические факторы, влияющие на процесс теплового загрязнения, а также наличие зданий на промплощадке. Модель требует небольших ресурсов персонального компьютера при практической реализации.

Постановка задачи, математические модели

Рассмотрим промышленную площадку, имеющую размеры R_x, R_y, R_z . Будем считать, что на месте аварии произошло быстрое горение углеводородов (или других веществ), в результате которого образовалась подзона с высокой температурой T_a – огненный шар. В данной работе принимается, что шар имеет характерный диаметр D в момент времени $t = 0$ и характерную температуру (рис. 1), эта темпе-

ратура сохраняется в течение времени tt . На площадке имеется маршрут эвакуации людей при аварии (на рис. 1 этот маршрут показан штриховой линией). Требуется определить величину возможного термического поражения людей на маршруте эвакуации при аварии.

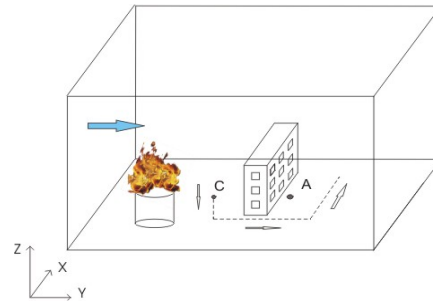


Рис. 1. Схема расчетной области

Для моделирования теплового загрязнения воздушной среды на промплощадке будем использовать уравнение энергии [3].

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

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

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

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [3].

В разработанной модели полагается, что профиль ветра неравномерный и рассчитывается по зависимости

$$u = u_1 \left(\frac{Z}{Z_1} \right)^n,$$

где u_1 – скорость ветра на высоте Z_1 ; $n = 0,16$.

Для расчета поля скорости воздушного потока на промплощадке делается допущение, что движение воздушной среды – потенциальное, тогда компоненты скорости воздушной среды определяются соотношениями

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial P}{\partial z},$$

где P – потенциал.

Уравнение для определения потенциала имеет вид

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0. \quad (2)$$

Постановка краевых условий для уравнения (1) рассмотрена в работе [2]. Для уравнения (2) ставятся следующие граничные условия:

- на твердых стенках $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали;
- на входной границе (границы втекания воздушного потока) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости;
- на выходной границе $P = P \cdot (x = \text{const}, y) + \text{const}$ (условия Дирихле).

Метод решения

Для численного интегрирования уравнений (1), (3) используются попеременно-треугольные неявные разностные схемы [3, 4]. 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. Это позволяет создать эффективный алгоритм расчета в областях сложной геометрической формы. В разработанной дискретной модели используется принцип маркирования расчетной области, это позволяет задавать в численной модели любую форму зданий на промплощадке, их расположение, форму огненного шара (или нескольких шаров).

Практическая реализация модели

На базе разработанной численной модели создан пакет прикладных программ THERMO-3D.

Пакет программ реализован на алгоритмическом языке FORTRAN. Рассмотрим практическое использование пакета на примере решения конкретной задачи.

Рассматривается загрязнение атмосферы при образовании огненного шара на промплощадке. Размеры расчетной области: $120 \times 120 \times 60$ м; диаметр шара – 30 м; температура продуктов горения в шаре 1100 °С; $a = 0,8$ м²/с; скорость ветра на высоте 10 м составляет 5,5 м/с; $tt = 7$ с; скорость передвижения людей на маршруте эвакуации составляет 3 м/с. Люди начинают движение сразу после аварии от здания (рис. 1, точка С). Люди располагаются на расстоянии 30 м от огненного шара.

Горячий воздух на своём пути встречает различные объекты, конструкции, людей. Термическое поражение людей может быть оценено с помощью параметра тепловой дозы $Th D$

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

где $T = f(x, y, t)$ – температура на месте нахождения человека (°С);

t – время экспозиции (с).

Термическое поражение (ожог 2-й степени) наступит при величине тепловой дозы, равной $Th \cdot D = 1100 \dots 1500$ °С·с (при $T > 71$ °С). Отметим также, что болевые ощущения человек начинает получать при температуре воздуха более 50 °С.

Ниже представлены данные о величине термической дозы:

$t = 3$ с	$Th \cdot D = 1644$ °С·с;
$t = 6$ с	$Th \cdot D = 4423$ °С·с;
$t = 9$ с	$Th \cdot D = 6864$ °С·с;
$t = 12$ с	$Th \cdot D = 7270$ °С·с;
$t = 15$ с	$Th \cdot D = 7727$ °С·с;

Из этой таблицы видно, что при аварии люди на маршруте эвакуации получают серьезные ожоги. Практически можно констатировать, что в случае такой аварии маршрут эвакуации на промплощадке является крайне небезопасным.

Рассмотрим теперь опасность поражения людей, если в момент аварии они находились в районе торца здания и начали двигаться по маршруту эвакуации. Величина термической дозы (в скобках приведено значение температуры воздуха на маршруте эвакуации в том

месте, где находятся в этот момент люди) в этом случае будет равна:

$$t = 6 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 598 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 164 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 9 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 1332 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 255 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 12 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 2193 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 257 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 15 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 3095 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 370 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Как видно из данной таблицы, люди, находящиеся возле здания в момент аварии, также получают серьёзные ожоги.

Теперь рассмотрим безопасность людей, которые в момент аварии находились за зданием (рис. 1, точка А) и решили не убежать. Величина термической дозы и температуры в этом случае составят:

$$t = 12 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 1238 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 328 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 15 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 2501 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 501 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 18 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 4183 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 599 \text{ } ^\circ\text{C});$$

$$t = 21 \text{ с} \quad \text{Th} \cdot D = 5998 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{с} \quad (T = 594 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Отсюда видно, что, как и в предыдущих случаях, люди получают серьёзные ожоги.

На последующих рисунках представлена динамика теплового загрязнения воздушной среды на промплощадке. Хорошо видно (рис. 2) положение огненного шара в момент аварии. Зона теплового загрязнения характеризуется быстрым вытягиванием в направлении ветра, в сторону здания. Из рис. 3, 4 видно, что горячий воздух быстро охватывает все здание.

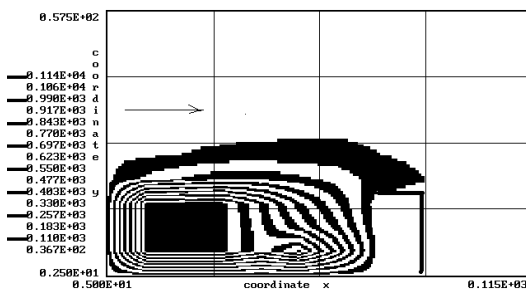


Рис. 2. Распределение изотерм, $t = 3,5$ с после аварии

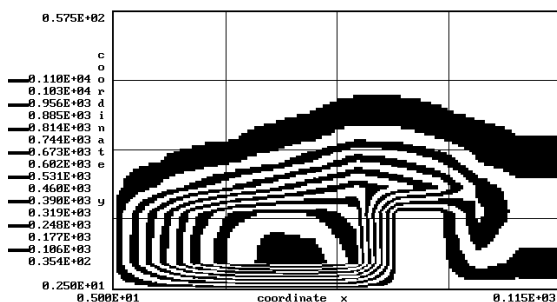


Рис. 3. Распределение изотерм, $t = 9$ с после аварии

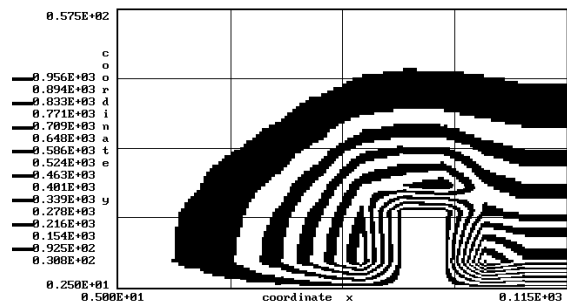


Рис. 4. Распределение изотерм, $t = 18$ с после аварии

Выводы

В работе построена численная модель теплового загрязнения воздушной среды на промплощадках при горении огненного шара. Модель основана на неявном разностном алгоритме решения трехмерных уравнений потенциального течения и энергии. Модель позволяет также рассчитать тепловое воздействие на людей, движущихся на маршруте эвакуации, и тем самым оценить безопасность этого маршрута. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении её развития для моделирования горения и переноса горячего воздуха с учетом вязкостных эффектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий: Учеб. пос. в 5-ти кн. / Под ред. В. А. Котляревского и А. В. Забегаява. – М.: АСВ, 2001. – 200 с.
2. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
3. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский, В. С. Чиркин. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – 2-е изд. – М.: Атомиздат, 1968. – 485 с.

Поступила в редколлегию 06.05.2008.