

Ю.А. Скоб, к.т.н, доцент, НАКУ "ХАИ",
С.А. Вамболь, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
В.А. Лыфарь, к.т.н., доцент, СТИ ВУГУ,
М.Л. Угрюмов, д.т.н., профессор, НАКУ "ХАИ"

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В ПРОСТРАНСТВЕ ОТ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ

(представлено д-ром техн. наук Басмановым А.Е.)

Представлен математический метод, позволяющий определить тепловые нагрузки в пространстве вблизи пламени пожара пролива произвольного контура с учетом лучевого воздействия видимых поверхностей пламени.

Ключевые слова: математический метод, пожар, тепловые нагрузки.

Постановка проблемы. При возникновении пожаров пролива на производствах, тепловые нагрузки от пламени на людей и объекты, находящиеся вблизи очагов пожара, представляют существенную опасность. Тем более, что пожары пролива в отличии от огненных шаров или вспышек существуют достаточно долго и при горении светлых нефтепродуктов или сжиженных газов до 40% энерговыделения приходится на долю теплового излучения.

Анализ последних достижений и публикаций. В научной литературе представлены модели пожаров пролива, основанные на эмпирических данных пирометрических замеров для среднеповерхностного излучения пламени при пожаре различных видов нефтепродуктов, позволяющие оценивать интенсивности излучений поверхности пламени и определить с некоторой степенью достоверности распределение тепловых нагрузок от цилиндрического очагового пламени [1,2]. При этом учитываются такие свойства, как поглощение излучения внутренними источниками излучения сажей и проницаемость для инфракрасного излучения атмосферы в зависимости от влажности воздуха. Модели упрощены до геометрических представлений коэффициентов видимости и представлены аналитическими зависимостями. Их использование позволяет рассчитать высоту пламени (излучающих продуктов горения), распределение тепловой нагрузки в пространстве от границы пламени.

Однако методы расчета тепловых нагрузок в пространстве от излучения пламени, основанные на моделях подобного рода, применимы только в случае необходимости предварительных оценок и для пожаров, форма пролива которых незначительно отличается от круговой. В случае возникновения протяженных очагов (сливо-наливная

эстакада) или нескольких очагов сложной формы, применение таких методов может приводить к большим погрешностям в оценке тепловых нагрузок.

Постановка задачи и ее решение. Актуальной задачей является разработка метода расчета тепловых нагрузок в пространстве от излучения пламени, позволяющего учесть сложность формы пламени и особенности интегрального теплообмена излучением.

Реализация такого метода может быть полезна при планировании тушения пожаров на предприятиях и средствах транспортировки легко воспламеняемых жидкостей. В этом случае целесообразно рассматривать поэтапно образование тепловой нагрузки и в дальнейшем отдельно геометрию пламени, алгоритм определения тепловой нагрузки в точке пространства.

Образование тепловой нагрузки. Тепловой обмен излучением между открытым пламенем различной формы (горящий шар, пожар пролива, факел) и приемником теплового излучения определяется коэффициентом излучения пламени C_0 (для абсолютно черного тела $C_0 = 0,00577 \frac{\kappa Bm}{m^2 \cdot K^4}$, стр. 31 [3]), средними температурами излучающей поверхности пламени (продуктов сгорания) и приемника и угловым коэффициентом видимости излучающей поверхности.

В работе [3] выражение результирующего теплового потока представлено в виде

$$Q_{\delta\alpha\zeta} = C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \iint_{F_1 F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi r^2} \cdot dF_1 dF_2,$$

где C_0 – коэффициент излучения пламени, $\frac{\kappa Bm}{m^2 \cdot K^4}$; T_1 – средняя температура излучающей поверхности, К; T_2 – средняя температура поверхности приемника излучения, К; r – расстояние от поверхности излучения до приемника, м; φ_1 – угол между нормалью к поверхности излучения и линией от приемника излучения до точки проведения нормали к поверхности излучения; φ_2 – угол между нормалью к поверхности приемника и линией видимости поверхности излучения; F_1 – площадь поверхности излучения, m^2 ; F_2 – площадь поверхности приемника, m^2 .

В расчетах необходимо учитывать поглощение теплового излучения атмосферой. В работах [4, 5] предложена зависимость для определения коэффициента поглощения теплового излучения атмосферой: $\tau = \exp[-7.0 \cdot 10^{-4} (r_c - 0.5d)]$, где $d = \sqrt{4 \cdot F / \pi}$ – эффективный диаметр

пожара пролива, м; F - площадь поверхности пролива, m^2 ; r_c - расстояние от геометрического центра пожара пролива до точки определения тепловой нагрузки, м.

Предположим, что существует тепловой обмен между элементарными поверхностями источника и приемника, при этом:

- размеры площадки приемника и источника равны между собой $F_1 = F_2 = 1m^2$, так как мы работаем с удельными тепловыми потоками и заранее площадь поверхности приемника неизвестна, а расстояния между элементарными площадками существенно превышают линейные размеры самих площадок;

- поверхность излучения всегда расположена под прямым углом к направлению на элементарную площадку приемника.

Исходя из вышеперечисленных соображений, и учитывая, что при этом угол φ_1 отличается от нормали на очень малую величину, можем записать результирующее уравнение обмена лучистыми потоками между элементарными площадками в виде

$$Q_{рез} = C_0 \cdot \tau \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \frac{\cos \varphi_2}{\pi r^2}.$$

Так как расстояние, на котором проводится калибровка может оказаться меньше допустимого, то результирующий удельный тепловой поток может оказаться выше максимального

$$Q_{max} = C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] / \pi r^2.$$

В таком случае считаем, что тепловой поток равен максимальному.

Геометрия пламени и алгоритм определения тепловой нагрузки в точке пространства. Графические данные об очаге пожара пролива вносятся в графическом редакторе в виде непрерывного замкнутого контура. Каждому контуру присваиваются свойства: наименование горючей жидкости (из базы данных по горючим веществам), данные о коэффициенте излучения, средней температуре пламени, скорости выгорания; площадь пролива (F) автоматически определяется графическим редактором после создания контура пролива.

Для расчета высоты пламени предлагается зависимость [4]:

$$H_f = 42d \left(\frac{\dot{m}}{\rho_a \sqrt{gd}} \right)^{0.61},$$

где H_f – высота пламени в м; $d = \sqrt{4F/\pi}$ – эффективный диаметр пролива, м; F – площадь пролива, m^2 ; \dot{m} – массовая скорость выгорания топлива, $kg/(m^2c)$; ρ_a – плотность воздуха, (по умолчанию – $1,29$) kg/m^3 ; g – ускорение свободного падения ($9,81$ m/c^2).

Полученный графический контур необходимо фрагментировать отрезками заданной пользователем длины (рис. 1).

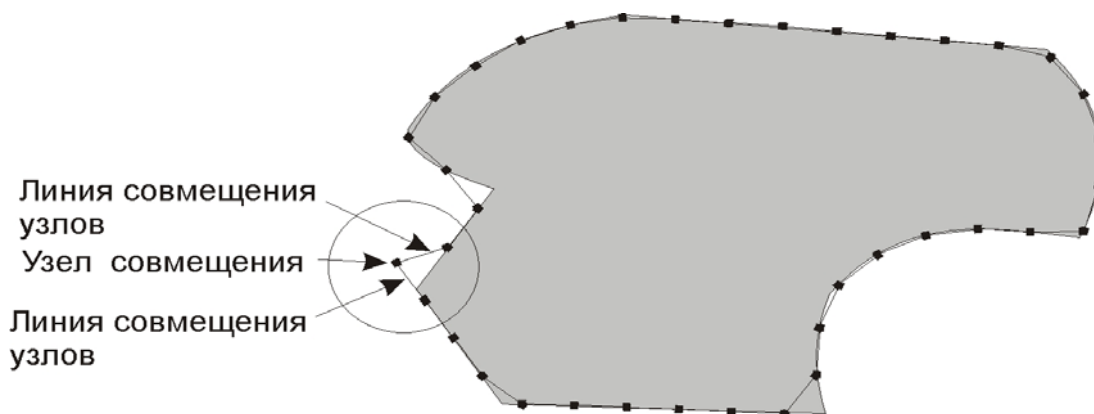


Рис. 1. Фрагментирование контура

Для каждого фрагмента необходимо вычислить координаты средней точки отрезка и определить нормаль к фрагменту в этой точке. Так как поверхность пламени представляет собой «поднятую поверхность» произвольного контура, то вектора нормали одного слоя будут повторяться с изменением шага по высоте. В результате фрагментирования мы получим поверхность в трехмерном пространстве, представленную на рис. 2.

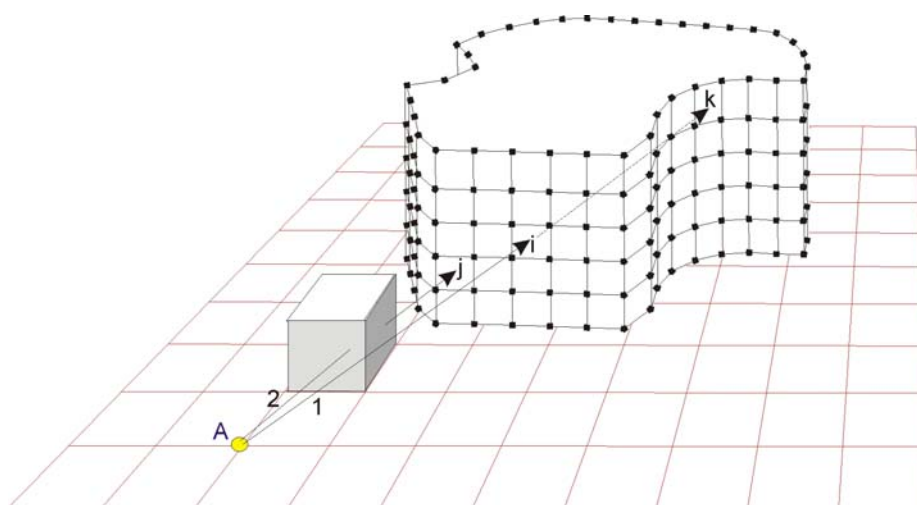


Рис. 2. Фрагментированный трехмерный контур и зоны «видимости» фрагментов из узлов

Важно определить полную тепловую нагрузку от каждого видимого фрагмента. Если угол φ_2 превышает $\pi/2$, то данный фрагмент считается невидимым и для него элементарная нагрузка не суммируется. Кроме того, фрагмент считается невидимым (см., например, рис. 2), если между точкой определения пространственной тепловой нагрузки (точка наблюдения) есть другой объект или ближе располо-

женная поверхность пламени. Пусть точка наблюдения А расположена таким образом, что фрагмент i «виден» без помех, т. е. на пути из точки А к центру этого фрагмента (путь 1) нет объектов. Фрагмент j «невидим», так как между точкой А и фрагментом (путь 2) находится здание. Фрагмент k находится под углом нормали менее $\pi/2$, но между k и А находится слой пламени, «затеняющий» k .

Необходимо реализовать алгоритм, определяющий принадлежность точки падения луча наблюдения пространству объекта и на основе этого алгоритма определять «видимость» выбранного для суммирования тепловой нагрузки фрагмента.

Для определения геометрических параметров зданий, в графическом редакторе для модели «Излучение пламени произвольной формы» для замкнутых объектов может вводиться параметр «высота объекта» (м). На основании этого параметра строится фигура «поднятая поверхность» для каждого выбранного объекта.

Степень тепловой нагрузки будем определять на уровне земли. Для этого на уровне земли создается сетка в форме множества четырехугольников, шаг которой задается пользователем в метрах. При этом количество j -х узлов, соответствующих центрам элементарных площадок, должно определяться размерами описывающего четырехугольника и шагом сетки. Общий тепловой поток в узел j равен сумме тепловых потоков от всех «видимых» i -х фрагментов

$$Q_j = C_0 \cdot \tau \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \sum_i \frac{\cos \varphi_{i2}}{\pi r_i^2}.$$

Если в качестве входных данных задается не температура пламени, а среднеповерхностная интенсивность теплового излучения E_f (так же как в пожаре пролива), то формула для определения теплового потока примет вид

$$Q_j = \tau \cdot E_f \sum_i \frac{\cos \varphi_{i2}}{\pi r_i^2}.$$

Цветная градуировка производится следующим образом. В цветовой модели HLS используется переменный параметр H с минимальным значением 0 и максимальным значением (принятом в соответствующей среде программирования). Параметры L и S остаются фиксированными (максимальными). Максимальное значение тепловой нагрузки определяется по полученной матрице значений Q_j . Минимальное значение принимаем равным болевому порогу, т. е. $Q_{\min} = 1,4 \text{ кВт/м}^2$.

Нормируем шкалу от 1 до 10. Так как $Q_{\max} \geq Q \geq Q_{\min}$, то

$$Q_n = \left(\frac{Q - Q_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right) \cdot 9 + 1.$$

Для определения степени цветности получаем значение параметра $H = H_{\max} \cdot \log(Q_n)$.

Для получения истинного значения тепловой нагрузки необходимо сделать обратное преобразование. Маска цветов должна храниться и «накладываться» на план (рис. 3).

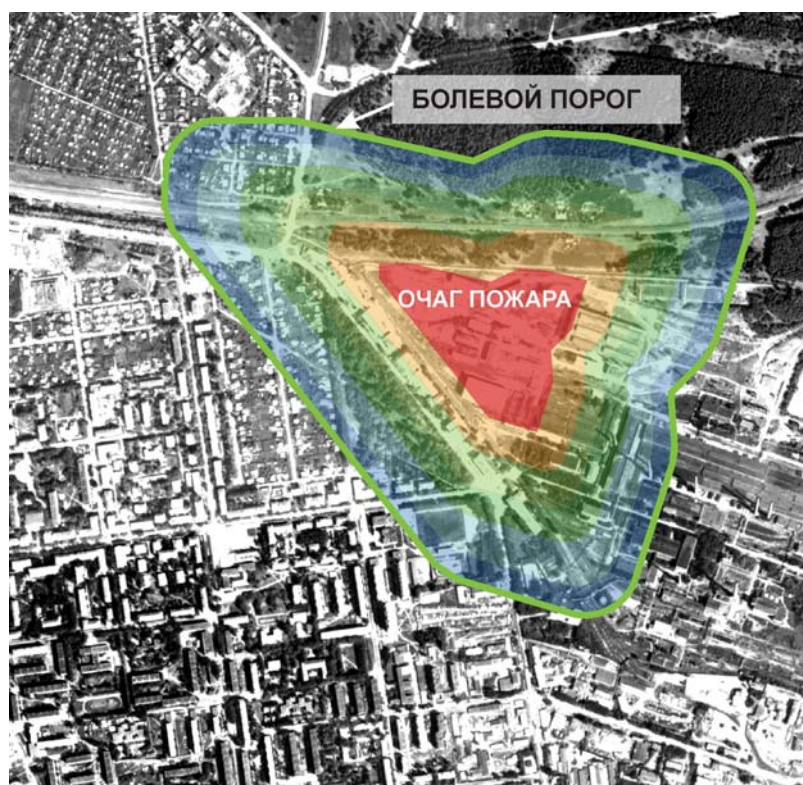


Рис. 3. Цветовое отображение степеней тепловых нагрузок на плане местности

Для отчета генерируется растровый файл на котором отображены: план местности, очаги пламени, цветовые поля тепловых нагрузок, цветовая шкала (вертикально справа). Кроме этого необходимо генерировать файл, содержащий сведения о данном эксперименте: наименование эксперимента, файла, тип модели, масса горючего вещества, скорость выгорания, время выгорания, теплофизические характеристики горючего вещества, используемые при расчетах, наименование очагов, площадь очагов пламени, площадь зон, ограниченных болевым порогом. Рационально генерировать html -файл, содержащий текст и рисунок (рисунки).

Выводы. Предложен математический метод, позволяющий определять тепловые нагрузки в пространстве вблизи пламени пожара пролива произвольного контура с учетом лучевого воздействия видимых поверхностей пламени.

Разработанная на его базе компьютерная система может использоваться в качестве инженерного инструмента для анализа пространственного распределения тепловых нагрузок с целью выявления зон, превышающих болевой порог.

Метод позволяет провести оценку уровня пожароопасности в расчетной области со сложным рельефом местности. Получены результаты расчетов различных вариантов пожаров проливов произвольного контура на местности с застройкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Methods for the calculation of physical effects. 'Yellow Book'. CPR 14E (Part 1). Sdu Uitgevers. Committee for the Prevention of Disasters. Third edition 1997. Chapter 3.

2. Krishna S. Mudan. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires / Progress in Energy and Combustion Science. – 1984. – No. 10. – pp. 59-80.

3. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. – 332 с.

4. Шебеко Ю. Н. Оценка индивидуального и социального риска аварий с пожарами и взрывами для наружных технологических установок / Ю.Н. Шебеко, А.П. Шевчук, В.А. Колосов и др. // Пожоровзрывобезопасность. – 1995. – Т. 4, №1. – С. 21-29.

5. Birk A. M., Anderson R. J. A Computer Simulation of a Derailment Accident. Part 1: Model Basis / Journal of Hazardous Materials. – 1990. – Vol. 25, No. 1/2. – P.121-147.

Ю.О. Скоб, С.О. Вамболь, В.О. Лифар, М.Л. Угрюмов

Метод розрахунку теплових навантажень в просторі від випромінювання полум'я довільної форми

Представлений математичний метод, що дозволяє визначити теплові навантаження в просторі поблизу полум'я пожежі протоки довільного контуру з урахуванням променевого впливу видимих поверхонь.

Ключові слова: математичний метод, пожежа, теплові навантаження.

Yu.O. Skob, S.O. Vambol, V.O. Lyfar, M.L. Ugryumov

Method of calculation of the thermal load in the space of the flame radiation freeform

Presents a mathematical method to determine the heat load in the space near the fire flame of arbitrary contour strait based on radiation exposure of visible surfaces.

Keywords: mathematical method, fire, heat loads.