

УДК 629.12.01

Д.В. Бурков, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: burkov@ua.fm

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ В СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Рассматриваются недостатки существующих способов расчета теплопроводности применительно к защитным устройствам. Предлагается математическая модель и программа для оптимизации конструктивных параметров защитных устройств по фактору их теплопроводности.

Для предотвращения развития аварийных ситуаций, возникающих при пожарах, по кабельным трассам, проходящим через ограждающие конструкции предлагается установка защитных устройств сферической формы, заполненных огнетушащим порошком [1]. Определение оптимальных геометрических параметров таких защитных устройств на этапе проектирования невозможно без решения задачи по расчету их теплопроводности.

Целью данной статьи является разработка достоверной математической модели, отражающей процесс теплопроводности защитных устройств различной формы, заполненных огнетушащим порошком с целью оптимизации их конструктивных параметров на этапе проектирования.

Проблема математического расчета с высокой степенью достоверности процесса теплопередачи в объектах различной конфигурации при нестационарном режиме до настоящего времени не решена из-за значительного числа переменных, оказывающих влияние на процесс теплопереноса.

Использование приближенных методов позволяет решить задачу теплопроводности, однако те из них, которые получили распространение, имеют ряд недостатков и допущений, ограничивающих их применение для расчета защитных устройств. Так, например, предложенный в работе [2] метод расчета теплопроводности конструкций не учитывает некоторых явлений, связанных с прогревом конструкций (например, физических свойств материала и изменения его теплофизических характеристик в зависимости от температуры). В методе расчета прогрева однослойных конструкций на основе аналитического решения дифференциального уравнения теплопроводности Фурье, учтена зависимость коэффициентов теплопереноса от температуры, однако для упрощения расчетов коэффициенты приняты постоянными и равными их значениям при определенных температурах [2]. Поскольку не для всех материалов имеются такие зависимости, то применение данного метода является ограничен-

ным. Данный так же метод не учитывает способность некоторых материалов оказывать активное воздействие на огонь. Д.т.н. А.И. Яковлевым получена формула расчета защитных конструкций при нестационарном режиме развития пожара. Однако полученная формула расчета является эмпирической и содержит ряд ограничений, не позволяющих применить ее для расчета защитных устройств. Метод элементарных тепловых балансов академика А.П. Ваничева [3] является наиболее точным, однако он не учитывает противопожарные свойства материалов, которые могут быть использованы в защитных устройствах, а с другой стороны, данный метод требует знания большого числа специфических физических свойств параметров применяемых материалов, что не всегда возможно вследствие того, что не все материалы исследованы в этом направлении. Кроме того, данный метод является трудоемким, требует обязательного использования вычислительной техники.

Применение указанных методов к расчету защитных устройств усложняется тем, что защитные устройства могут иметь различную геометрическую форму, а в качестве наполнителя может использоваться огнетушащий порошок, который оказывает активное воздействие на процесс горения, а в рассмотренных выше методах расчета теплопроводности не учитывается форма защитных устройств и свойства огнетушащего порошка.

Для получения математической модели теплопроводности защитных устройств с учетом их формы и наполняющего материала, принимаются следующие условия.

1. Рассматривается теплопроводность при одномерном поле, когда учитывается изменение температуры тела во времени только в одном направлении по системе координат (x,y,z) . Данное условие является достаточным, так как в результате расчета требуется определить температуру с противоположной стороны защитного устройства, а с боковых сторон исследуемый объект считается бесконечно большим (поскольку защитное устройство рассматривается как единое целое с ограждающими конструкциями, в которых оно устанавливается).

2. Рассматривается теплопроводность при нестационарном режиме, т.е. решается задача определения температуры $T_{x,\tau}$ в любой точке тела на расстоянии x от обогреваемой поверхности в любой момент времени τ .

При этом условии цель расчета состоит в определении температурного состояния тела и полученной или отданной телом теплоты по истечении определенного периода времени. Подобные расчеты используются в авиационной и космических технологиях и могут быть применены для получения решения поставленной в данной работе задачи.

3. Используются граничные условия третьего рода, которые состоят в задании температуры сред, омывающих поверхности тела, и условий теплообмена между средами и поверхностями (коэффициент теплообмена). На

практике такие условия задаются в случае когда исследуется тело с известным коэффициентом теплопроводности λ и коэффициентом температуропроводности a_t , начальной температурой T_0 , а температура окружающей среды повышается до T_f и остается постоянной.

4. Расчет производится при условии, что температура в помещении, в котором произошло возгорание, быстро достигает T_f и держится на этом уровне достаточно долго, что соответствует теории развития пожаров.

5. Учитывается отсутствие источников тепла постоянной мощности, т.е. в помещении отсутствуют нагревательные установки или работающее оборудование, выделяющее значительное количество тепла.

6. Распределение температуры в помещении в начальный момент времени – произвольное.

Рассмотренные выше условия протекания пожара с передачей тепла в соседнее помещение через ограждающую конструкцию соответствуют законам теплообмена, в которых теплопроводность является основным фактором в переносе тепла. Данный процесс отражается законом Фурье – Кирхгофа без учета сил диффузии. В общем случае уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} + I_g \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности; T – температура; τ – время; x – расстояние до точки прогрева; I_g – источник тепла постоянной мощности.

Одномерное нестационарное поле, рассматриваемое в нашем случае, описывается дифференциальным уравнением (1), имеющим вид

$$\frac{dT(x, \tau)}{dt} = a \left(\frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2} + \frac{\Gamma}{x} \frac{dT(x, \tau)}{dx} \right) + \frac{I_g(x, \tau)}{c\rho}, \quad (2)$$

где Γ – постоянное число (для пластины принимается равным 0); $\frac{dT(x, \tau)}{dt}$

– первая производная температуры t по времени τ ; $\frac{d^2T(x, \tau)}{dx^2}$ – вторая

производная температуры t по координате x ; $\frac{dT(x, \tau)}{dx}$ – первая производ-

ная температуры t по координате x ; $\frac{I_g(x, \tau)}{c\rho}$ – источник тепла постоянной

мощности; c – удельная теплоемкость материала; ρ – плотность.

Оптимальным интегральным преобразованием для решения поставленной одномерной задачи является использование обобщенного интегрального преобразования Фурье-Ханкеля, полученное М.Д.Михайловым и

которое объединяет конечные преобразования Фурье и преобразование Ханкеля.

Решение уравнения (2) имеет вид

$$\frac{T_{x,\tau} - T_0}{T_f - T_0} = \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}}\right) \right] - e^{\alpha/\lambda x + (\alpha/\lambda)^2 a_T\tau} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a_T\tau}\right) \right], \quad (3)$$

где c – удельная теплоемкость материала; α – коэффициент теплоотдачи.

Для оценки теплопроводности конструкции из уравнения (3) выделяем время $T_{x,\tau}$, которое равно

$$T_{x,\tau} = \left(\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}}\right) \right] - e^{\alpha/\lambda x + (\alpha/\lambda)^2 a_T\tau} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a_T\tau}\right) \right] \right) (T_f - T_0) + T_0. \quad (4)$$

Полученная математическая модель (4) определяет огнестойкость защитных устройств, имеющих форму прямоугольника и заполненных материалом, не обладающим противопожарными свойствами, как это и было задано в начальных условиях. Для учета формы защитного устройства и заполняющего его материала, вводится коэффициент формы Δ , характеризующий влияние формы защитного устройства на передачу тепла и коэффициент огнеподавления σ , характеризующий торможение процесса горения (при использовании огнетушащих материалов), которые могут быть учтены в полученной математической модели следующим образом:

$$T_{x,\tau} = \left(\left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}}\right) \right] - e^{\alpha/\lambda x + (\alpha/\lambda)^2 a_T\tau} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_T\tau}} + \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a_T\tau}\right) \right] \right) \times \frac{1}{\Delta \cdot \sigma} \cdot (T_f - T_0) + T_0. \quad (5)$$

Введение коэффициентов формы и огнеподавления в уравнение (4) проводилось по результатам обработки и сравнения лабораторных и вычислительных экспериментов с защитными устройствами, позволившими выявить влияние на $T_{x,\tau}$ различных форм защитных устройств и используемых для их заполнения материалов. Обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с рекомендациями [4]. Как показали результаты исследований [1], между формой защитного устройства, материалом, его заполняющим, и изменением температуры на необогреваемой стороне существует обратно пропорциональная зависимость, которая и учитывается коэффициентами Δ и σ .

Численные значения коэффициентов Δ и σ определяются по результатам лабораторных экспериментов с защитными устройствами. Так, для сферических защитных устройств коэффициент формы $\Delta_{\text{сфер.}} = 1,15$, а коэф-

фициент огнеподавления для огнетушащего порошка $\sigma_{\text{пор.}} = 1,29$.

Для автоматизации процедуры расчета теплопроводности защитных устройств в среде программирования C++ Builder была написана программа «Расчет параметров защитных устройств». Данная программа реализует алгоритм решения уравнения (5) и позволяет в короткое время произвести расчеты по определению размеров защитных устройств по заданным параметрам теплопроводности.

Проверка достоверности математической модели и программы расчета теплопроводности защитных устройств производилась путем сравнения

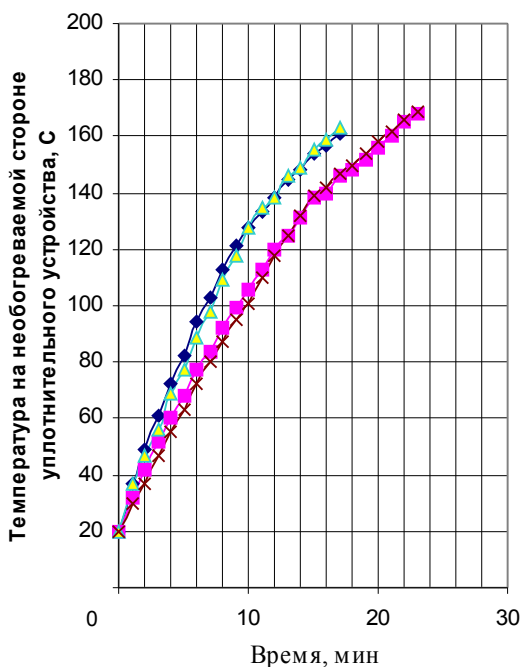


Рисунок 1 – Сравнение лабораторного и вычислительного

Выч-70, Выч-100, Лаб-70, Лаб-100 – результаты вычислительных и лабораторных экспериментов с защитными устройствами с огнетушащим порошком

данных лабораторных и вычислительных экспериментов с защитными устройствами сферической формы, заполненными огнетушащим порошком (рисунок 1), которые показали, что результаты сопоставимы и расхождение составляет не более 10%.

Результаты проведенных исследований могут в дальнейшем быть использованы для проектирования защитных устройств на любых объектах,

содержащих кабельные трассы, а также для оценки теплопроводности тел различной конфигурации.

Библиографический список

1. Бурков Д.В. Повышение надежности, живучести и безопасности кабельных и трубопроводных трасс СЭУ / Д.В.Бурков: Автореферат диссертации канд. техн. наук: К 50.052.03. – Защищена 02.01.03; Утверждена 19.04.03. — Севастополь, 2002. — 24 с.
2. Романенко П.Н. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле / П.Н. Романенко, Ю.А. Кошмаров, М.П. Башкирцев. — М.: Изд-во ВИПТШ МВД СССР, 1977. — 416 с.
3. Ваничев А.П. Приближенный метод решения задач теплопроводности в твердых телах / А.П. Ваничев // Известия АН СССР. — 1946. — № 12. — С. 23.
4. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. — М.: Изд-во «Москва», 1972. — 382 с.

Поступила в редакцию 7.10.2003 г.