

Р. Ш. Еналеев, И. В. Красина, В. С. Гасилов,
О. А. Тучкова, Л. И. Хайруллина

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ

Ключевые слова: тепловой поток, методы измерения, модели расчета, конструкции калориметров.

Проведен сравнительный анализ отечественных и зарубежных данных по моделям и конструкциям калориметров для измерения статических и динамических высокоинтенсивных тепловых потоков. Предложены новый подход для моделирования теплообмена приемников с тепловым источником с учетом потерь конвекцией и излучения.

Keywords: heat flux, measurement methods, calculation models, design of calorimeters.

Comparative analysis of domestic and foreign data on models and designs of calorimeters for measure static and dynamic high-intensity heat fluxes is held. New approach of heat transfer modeling between receivers and heat source is proposed now with taking into account the losses by convection and radiation.

1. Введение

Одной из опасных природных, техногенных, стихийных катастроф являются лесные пожары. Уменьшение рисков их возникновения и оперативная ликвидация последствий пожаров на окружающее пространство является важной экологической и социально – экономической проблемой.

Ученые многих стран проводят исследования по космическому мониторингу пожаров и установлению закономерностей возникновения и распространения пламени. Для обсуждения ключевых аспектов проблемы пожаров международная Ассоциация лесных пожаров организовала в штате Северная Каролина и С. Петербурге IV международную конференцию «Fire Behavior and Fuels» (1-4 июля 2013). На российской конференции было представлено более 100 докладов из России, Кореи, Японии, Австралии, Италии, Испании, Греции, Франции, Голландии, США.

В представленных докладах основное внимание было сфокусировано на экспериментальных результатах по изучению газообразных продуктов пиролиза, влиянию структуры и влажности лесных горючих материалов на их воспламеняемость, условий окружающей среды, механизмов нагрева и распространения пламени при верховых и низовых пожарах и других аспектах воздействия пламени пожаров на объекты окружающего пространства.

Однако сообщения по результатам исследования процесса загорания горючих текстильных материалов в программе отсутствовали.

Поэтому у зарубежных специалистов особый интерес вызвали сообщения ученых КНИТУ и Томского государственного университета по математическому моделированию и прогнозированию характеристик загорания горючих полимерных материалов при статическом [1] и динамическом [2,3] условиях нагрева.

Моделирование в лабораторных условиях воздействие опасных факторов пожара на горючие полимерные материалы включает ряд сложных технических задач [4]. Одной из них является достоверное измерение плотности теплового потока.

Подобные задачи относятся к некорректным задачам уравнений математической физики, а для одномерных твердотельных датчиков теплового потока (ДТП) – обратным задачам уравнений теплопроводности.

В данной работе представлен анализ моделей и конструкций датчиков теплового потока. Предложены новые подходы в оперативном определении динамики изменения интенсивности теплового потока на основе математического моделирования процесса нагрева поверхности материала датчика с учетом охлаждения конвекцией и излучения.

2. Модели расчета

2.1. Технические требования к ДТП

В моделях и конструкциях методов определения плотности высокоинтенсивных тепловых потоков ключевым элементом является приемник или, так называемый, датчик теплового потока (ДТП).

В литературе отсутствует единая классификация ДТП и универсальная конструкция для измерения тепловых потоков в нефтехимии и металлургии, энергетике и процессах горения, авиационной и космической техники.

Обоснованный выбор ДТП можно сделать после анализа характеристик реальных источников теплового потока и технических требований, обеспечивающие минимальные погрешности измерения.

Очевидно, основные требования можно сформулировать в следующем виде:

- конструкция крепления (держателя) датчика должна обеспечивать минимальные утечки тепла по конструктивным элементам;
- при многократных применениях датчика оптические свойства воспринимающей тепло поверхности и теплофизические свойства материала должны оставаться неизменными;
- термоэлектрические измерители температуры датчика не должны влиять на

распределение температуры по геометрическим координатам;

- размеры датчика должны обеспечивать равномерность теплового потока по нормали к поверхности датчика (одномерная задача);

- чувствительность термоэлектрических преобразователей должна обеспечивать требуемый доверительный интервал при вероятности 0,95.

Ошибки измерения можно учесть экспериментально, расчетным методом и расчетно-экспериментальным методом.

2.2. Экспоненциальный метод

Экспоненциальный или, так называемый, калориметрический метод является наиболее распространенным в технике теплофизического эксперимента благодаря простоте конструкции и упрощенной модели расчета.

В этом методе интенсивность теплового потока измеряется по скорости нагрева приемного теплоизолированного элемента:

$$q_0 = \delta_k c_k \rho_k \frac{dT}{d\tau}, \quad (1)$$

где δ - толщина калориметра, c_k, ρ_k - теплоемкость и плотность материала калориметра, $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)$ - скорость нагрева калориметра.

Приемный элемент выполняется из материала с высокой теплопроводностью (обычно из меди). На тыльной поверхности калориметра крепится термopара, фиксирующая рост температуры во время нагрева. В природных и техногенных пожарах и их имитации в натурных и лабораторных условиях теплообмен между пламенем пожара и испытуемым материалом может происходить тремя механизмами: конвекцией, излучением и их комбинацией.

Соответственно при измерении интенсивности для модели (1) необходимо рассматривать три граничных условия теплообмена приемника с окружающей средой.

Граничное условие I рода по закону Ньютона. При небольших значениях коэффициента теплообмена с окружающей средой α скорость изменения температуры в любой точке приемного элемента может служить мерой для определения величины теплового потока. Необходимым условием равномерного распределения температуры в элементе является малость значения критерия Био

$$Bi = \alpha \delta_k / \lambda, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала приемника.

В этом случае температура приемника является экспоненциальной функцией времени. Поэтому в [5] метод называется экспоненциальным.

В [5] установлено, что (1) справедливо при $Bi < 0,01 - 0,02$, когда значения температуры во всех точках калориметрического элемента практически равны. Тогда с учетом требований к ДТП приемник

можно рассматриваться как модель неограниченной пластины.

В стандартных методах испытания воспламеняемости материалов [6] моделируются статические условия нагрева, при которых плотность теплового потока является постоянной, что соответствует граничному условию II рода. При этом температура приемника при нагреве будет линейной функцией времени, а скорость роста температуры калориметра остается постоянной.

При динамических условиях нагрева плотность теплового потока является явной функцией времени. Для такого импульсного нагрева определение плотности теплового потока по (1) связано с непреодолимыми математическими трудностями, связанными с численным интегрированием экспериментально измеренной температуры калориметра.

Теоретически возможны различные подходы в измерении интенсивности тепловых потоков при динамическом нагреве. Один из них строится на технологии обратных задач теории теплопроводности, алгоритм другого - предлагается в разделе четыре.

По литературным данным максимальная суммарная погрешность экспоненциального метода составляет 10 %.

2.3. Метод охлаждаемого калориметра

По результатам анализа литературных данных можно выделить следующие общие подходы в разработке ДТП в зависимости от скорости нагрева и длительности его воздействия.

По времени воздействия условно можно выделить ДТП длительного и кратковременного действия. Для предохранения приемника теплового потока от разрушения при длительном воздействии энергии нагреваемый элемент охлаждается водой.

Как правило, ДТП длительного действия применяют для измерения стационарных интенсивных тепловых потоков. Если пренебречь утечкам тепла с нерабочих поверхностей ДТП, то средний удельный тепловой поток к поверхности калориметра [7] определяется как

$$q_0 = \frac{c_s \cdot m_s \cdot \Delta t}{F}, \quad (3)$$

где F - площадь рабочего элемента калориметра, c_s, m_s - теплоемкость и массовый расход воды соответственно, Δt - нагрев охлаждающей воды.

Из (3) следует, что для определения теплового потока отпадает необходимость знания зависимости теплофизических свойств нагреваемого элемента от температуры. Однако ошибки, обусловленные утечками тепла и изменениями в расходе охлаждающей воды, не учтенные в расчетной схеме, могут быть существенными.

2.4. Двухслойный калориметр

В прикладных задачах интенсивность теплового потока может меняться в широких

пределах от 10^3 до 10^7 Вт/м² [8]. При интенсивности теплового потока до 10^5 Вт/м² расчет плотности теплового потока можно проводить по формуле (1), т.к. для высокой теплопроводности материала приемного элемента можно принять равномерное распределение температуры по глубине элемента. Такие задачи можно назвать однозначными, т.к. интенсивность теплового потока однозначно определяется по формуле (1).

При потоках с интенсивностью более 10^6 Вт/м² для равномерного нагрева толщина приемника ДТП должна быть несколько микрон, что сравнимо с размерами датчика температуры.

Поэтому для таких измерений применяют двухслойные ДТП, состоящие из нагреваемого потоком чувствительного элемента (термопара или термометр сопротивления), расположенного на поверхности толстой подложке с известными теплофизическими свойствами [7].

Однако влияние подложки практически не сказывается только на узком интервале времени воздействия теплового потока.

Поэтому для широкого диапазона изменения интенсивности теплового потока и времени его воздействия используется методология обратных задач [9].

Цель метода обратных задач состоит в восстановлении функции теплового потока на границе приемника ДТП по экспериментально измеренным значениям температуры по глубине приемника ДТП.

3. Конструкции датчиков

Модели расчета плотностей теплового потока впервые реализованы в конструкциях зарубежных исследователей в 50-60 годах прошлого столетия.

Конструкции и методы условно принято разделять на две группы: калориметрические и радиометрические. В калориметрических методах экспериментально измеряемая температура фактически фиксирует приращение энтальпии датчика в процессе нагрева. Обработка результатов эксперимента по (1) позволяет рассчитывать динамику изменения интегрального значения поглощенного датчиком теплового потока.

Таким образом, калориметрия пригодна для измерения интегрального потока или средней облученности, но не дает информации о распределении ее во времени и пространстве.

В радиометрических методах конструкция датчика и метод измерения позволяют по экспериментальным измерениям определять динамику изменения плотности теплового потока.

При калориметрических измерениях должны выполняться два условия: наличие малых приращений температуры (потеря тепла на конвекцию излучение пренебрежимо малы); контактирующая поверхность диска должна быть мала по отношению к массе приемника. Оба условия удовлетворяются при увеличении толщины диска. Однако при этом уменьшается чувствительность. В работе [10] получена корреляция между значениями

максимальной толщины при заданной скорости реакции и определена постоянная времени затухания.

3.1. Дискковый калориметр

Конструкция дисккового калориметра [7] показана на рис. 1.

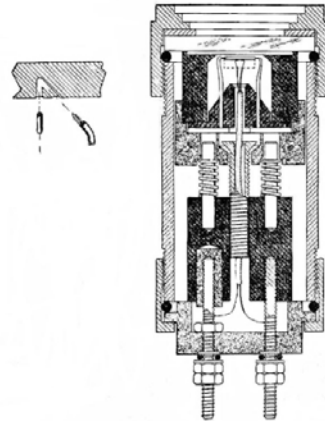


Рис. 1 - Схема полевого калориметра (NRDL, США). Слева показан монтаж термопары в пластине приемника

Поглощающий тепловой поток диск, закреплен в вакуумной камере с кварцевым окном. Калориметр не требует громоздкого лабораторного оборудования и имеет довольно прочную конструкцию. Поэтому его еще называют дискковым калориметром.

Все калориметры с твердым поглотителем обладают общим недостатком: если их температура немного выше, чем температура среды, потерями энергии на конвекцию и излучение пренебречь нельзя. Поэтому их применение ограничивается или малыми потоками, или кратковременной экспозицией.

3.2. Проточные калориметр

Калориметры с охлаждающей жидкостью (проточные стационарные калориметры) можно использовать при неограниченном времени экспозиции; предельная величина потока в них зависит только от максимальной скорости течения охлаждающей жидкости. Один из простейших калориметров такого типа [11] состоит из прямой трубки, снабженной поглощающим элементом, и экраном. Приращение температуры воды измеряется двумя рядами дифференциальных термопар (рис. 2).

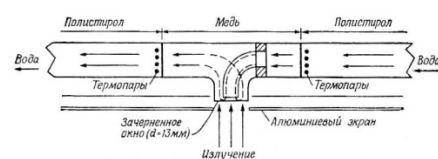


Рис. 2. Схема проточного калориметра

Широкое применение нашел вариант калориметра [12], схема которого приведена на рис. 3.

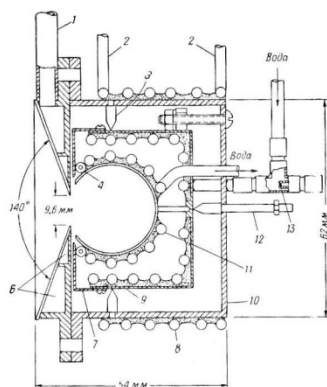


Рис. 3 - Сферический калориметр с водоохлаждаемой диафрагмой: 1 - вода; 2 - трубопровод; 3 - установочные штифты; 4 - стеклянные шарики; 5 - приемник диаметром 25,4 мм; 6 - каналы для охлаждения диафрагмы; 7 - крышка цилиндра; 8 - змеевик внешнего кожуха; 9 - цилиндрический экран; 10 - внешний кожух; 11 - калориметрический змеевик; 12 - установочный винт; 13 - термопара

Он состоит из сферического поглотителя с конической диафрагмой, охлаждаемой водой; поглотитель заключен в цилиндрический корпус. Сначала вода омывает змеевик, припаянный к внутреннему цилиндру, и поглощает тепло, излучаемое полостью. Затем вода омывает змеевик, припаянный к полости, изнутри зачерненный химическим способом. Приращение температуры потока воды измеряется дифференциальной термопарой. Два других водяных потока выравнивает температуру диафрагмы и цилиндрического корпуса относительно окружающей среды. Диафрагма от поглотителя отделена воздушным зазором, устраняющим передачу тепла путем теплопроводности. Подсчитано, что всего 1% вошедшего излучения отражается приемником. Расчет возможной погрешности от всех источников дает величину $\pm 5\%$.

Дальнейшее усовершенствование этого калориметра состоит в замене сферического приемника более эффективной полостью [13]. Было подсчитано и экспериментально проверено [14], что полость в виде обращенного корпуса при отношении глубины к диаметру, равном ~ 8 , обладает более высокой поглощательной способностью, чем сферическая плоскость.

4. Динамический режим

Калориметрические измерения дают средние значения потока по фокальному объему и по времени наблюдения. Однако во многих случаях требуется знать пространственное и временное распределение плотности потока.

Для этих целей разработано несколько быстроедействующих радиометров с довольно малой

чувствительной поверхностью, которые могут применяться для измерения мощных потоков излучения в оптических печах [14].

4.1. Радиометры

Радиометр, впервые примененный для оптической печи, представляет собой вариант прибора для малых потоков с водяным охлаждением [15] (датчик Гардона). Схема этого прибора показана на рис. 4.

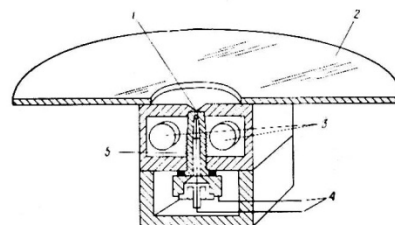


Рис. 4 - Схема миниатюрного радиометра для измерений полного потока и распределения плотности: 1 - приемник (черная фольга из константана); 2 - изолированная диафрагма; 3 - водяное охлаждение; 4 - дифференциальная термопара (медь-константан); 5 - медный винт для отвода тепла

Чувствительным элементом является константановая фольга диаметром 0,9 мм и толщиной 0,05 мм, расположенная на конце полого медного винта. С обратной стороны в центре фольги приварена тонкая медная проволока, образующая горячий спай медно-константановой термопары. Винт закреплен в медном корпусе, охлаждаемом водой и служащим теплоотводом с бесконечно большой теплоемкостью. Значение электродвижущей силы на выходе прибора зависит от разности температур горячего спая в центре фольги и холодного спая у края фольги, находящегося в контакте с медным корпусом. Подсчитано [15], что сигнал радиометра является линейной функцией плотности потока. Расчеты основаны на линейном законе Фурье. Тщательная градуировка подтвердила правильность этих расчетов. Радиометр имеет расчетную чувствительность, равную $0,037 \text{ мВ/кал}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{сек}^{-1}$. Для точных измерений рекомендуется градуировка каждого прибора. Постоянная времени прибора 0,01 сек. Чувствительный диск этого прибора покрывается камфарной сажой с целью создания стандартной поглощающей поверхности. Однако наблюдалось [14], что покрытие повреждается в случае использования радиометра при $200 \text{ кал/см}^2\cdot\text{сек}$ и выше в окисляющей атмосфере. Было установлено [16], что довольно устойчивым покрытием является MgO , выдерживающий экспозиции в несколько минут и плотности потока до $975 \text{ кал/см}^2\cdot\text{сек}$. Диск покрывается MgO при сжигании магниевой ленты в воздухе. Свежее покрытие затем подвергается действию потока с большой плотностью для того, чтобы окислить нитрид магния, который попутно образуется при горении. Хотя окись MgO слабо гигроскопична,

после длительного перерыва необходимо проводить «тренировку» прибора в потоке с большой плотностью. Чувствительность приборов с покрытием MgO естественно ниже, чем с покрытием из камфорной сажи. Однако уменьшение чувствительности компенсируется увеличением Э.Д.С., получаемой при тепловых потоках с большой плотностью.

Литература

1. R.Sh. Enalejev. *Mathematical model of the ignition of fuels*. Book of abstracts of the 4-th Fire behavior and Fuels conference, St.Petersburg, 1-4 July 2013. 77 p.
2. V.T. Kuznetsov, R.Sh. Enalejev, A.I. Filkov, E.Sh. Telyakov, V.O. Guk. *Ignition of wood under dynamic conditions of supply of radiant energy flow*. Book of abstracts of the 4-th Fire behavior and Fuels conference, St. Petersburg, 1-4 July 2013, p. 57.
3. R.Sh. Enalejev, A.I. Filkov. *Ignition of fabric at dynamic heating*. Book of abstracts of the 4-th Fire behavior and Fuels conference, St.Petersburg, 1-4 July 2013, p. 58.
4. Р.Ш. Еналеев, Э.Ш. Теляков, И.В. Красина, В.С. Гасилов, О.А. Тучкова. *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 8, 322 – 332 (2013).
5. Кудрявцев Е.В., Чакалев К.Н., Шумаков Н.В. *Нестационарный теплообмен*. М.: Изд-во АН СССР, 1961,
6. Р.Ш. Еналеев, И.В. Красина, В.С. Гасилов, Ю.С. Чистов, Л.И. Хайруллина. *Вестник Казанского технологического университета*, **16**, 13, 73 – 78 (2013).
7. C.P. Butler. *Calibration of sources for imaging furnaces*, *Proc. of the Intern. Conference on Image Furnace Techniques*, Plenum Press, N.Y., 1964.
8. Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. *Тепловая защита*. Энергия, Москва, 1976. 392 с.
9. О.М. Алифанов, М.И. Горшков, В.К. Зайцев, Б.М. Понкратов. *Исследование переходных процессов теплообмена между твердым телом и плазменной струей*. ИФХ, **Т XXIX**, 361 (1975).
10. A. Broido, A.B. Willoughby. Measurement of intense beams of thermal radiation, *J. Opt. Soc. Am.*, 48, 5, 344 (1968).
11. F.H. Schmidt, R.C. Williams, W.T. Ham, J.W. Brooks, E.I. Evans. Experimental production of flash burns, *Surgery*, 36, 1163 (1954).
12. P.E. Glaser. *High radiation-flux, water-flow calorimeter*. *Rev. Sci. Instr.*, 28, 12, 1084 (1954).
13. T.S. Laszlo *On radiant energy in high temperature research*. *J. Solar Energy*, 5, 4, 133 (1961).
14. T.S. Laszlo. *Measurement and application of high heat fluxes in a solar furnace*. *J. Solar Energy*, 6, 2 (1962).
15. R. Gardon. *An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation*. *Rev. Sci. Instr.*, 24, 5, 366 (1953).
16. T.S. Laszlo, P.J. Sheehan. *Investigations of thermal imaging techniques*, *Proc. of the Intern. Conference of Image Furnace Techniques*, Plenum press, N.Y., 1964.
17. С.Н. Воронков, Л.Я. Кашпоров, Д.З. Сафронов. *Физика горения и взрыва*, 5, 38 -45 (1993).
18. Р.Ш. Еналеев, Ю.Ф. Гортышов, В.А. Качалкин, А.М. Осипов. *Тепло- и массообмен в двигателях летательных аппаратов: Межвузовский сборник*. КАИ, Казань, 148 (1982).

© **Р. Ш. Еналеев** – к.т.н., ст. науч. сотр. каф. плазмохимических и нанотехнологий высокомолекулярных материалов КНИТУ, firepredict@yandex.ru; **И. В. Красина** – д.т.н., зав. каф. технологии химических, натуральных волокон и изделий КНИТУ, irina_krasina@mail.ru; **В. С. Гасилов** – к.т.н., доц. каф. промышленной безопасности КНИТУ; **О. А. Тучкова** – к.т.н., ст. препод. каф. промышленной безопасности КНИТУ, touchkova-o-a@mail.ru; **Л. И. Хайруллина** – к.с.н., доц. каф. промышленной безопасности КНИТУ, lhda79@mail.ru.