

УДК 536.24

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ПЛАМЕНИ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СЕНСОРОВ

С. А. Трубачев¹, О. П. Коробейничев¹, А. Г. Шмаков¹, А. Р. Сагитов^{1,2}

¹Институт химической кинетики и горения СО РАН им. В. В. Воеводского, 630090 Новосибирск, korobein@kinetics.nsc.ru

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Впервые количественно измерены полные и лучистые тепловые потоки из пламени на поверхность твердого топлива (полиметилметакрилат) в зоне горения при горизонтальном распространении пламени по поверхности топлива с помощью двух миниатюрных водоохлаждаемых датчиков размером 2.3×2.3 мм, установленных внутри пластины. Разработана конструкция водяного охлаждения датчиков размеров $2 \times 2 \times 0.5$ мм (greenTEG AG), которая позволила размещать их непосредственно в зоне горения. Лучистый тепловой поток измерялся датчиком с защитным окном из ZnSe, а общий тепловой поток измерялся аналогичным датчиком без защитного окна. Определенный с помощью датчиков кондуктивный тепловой поток сравнивался с рассчитанным по данным измерения температуры в пламени полиметилметакрилата тонкими термопарами. Максимальные, измеренные с помощью термодатчиков лучистый и полный тепловые потоки из пламени на поверхность полиметилметакрилата составили $30 \div 35$ и $70 \div 75$ кВт/м² соответственно.

Ключевые слова: полиметилметакрилат, датчик теплового потока, лучистый тепловой поток, кондуктивный тепловой поток, пожар, распространение пламени.

DOI 10.15372/FGV2022.9289

EDN VDJFYV

ВВЕДЕНИЕ

Результаты измерения тепловых потоков служат важной информацией, в частности, при оценке влияния теплоизоляции в машиностроении и строительстве, для понимания процессов в котлах, печах, двигателях внутреннего сгорания и т. д. Одной из важных задач является определение величины тепловых потоков на поверхность топлива при распространении по нему пожара, в частности определение вкладов различных видов теплопередачи от пламени к твердому топливу в зоне горения, таких как кондуктивный, конвективный и лучистый теплоперенос. Эта информация позволяет исследователям тестировать и совершенствовать численные модели, описывающие условия возникновения и распространения пожаров, а также модели распространения пламени по твердым горючим материалам [1–5].

Для измерения тепловых потоков рассматривались датчики различной конструкции. Гардон [6] предложил датчик теплово-

го потока, основанный на измерении разности температур в центре и на краю тонкого металлического диска, являвшегося чувствительным элементом прибора. Датчики этого типа обладают низкой чувствительностью и, как правило, малой механической стойкостью, но имеют малое время отклика.

Дифференциальные батарейные термопары, составленные из гальванически покрытых участков термоэлектрода в паре с непокрытыми участками, нашли достаточно широкое применение. Одно из первых исследований гальванических термопар было предпринято в работе [7].

Датчики типа Шмидта — Бельтера основаны на термоэлементе, состоящем из ряда последовательных термопар [8]. Напряжение на выводах такого термоэлемента пропорционально разнице температур на поверхности чувствительного элемента датчика. Датчики Шмидта — Бельтера обладают более высокой чувствительностью (0.5 мкВ/(Вт/м²)), чем датчики Гардона ($5 \cdot 10^{-4}$ мкВ/(Вт/м²)), но по сравнению с последними имеют меньшую максимальную температуру нагрева чув-

ствительного элемента (95 и 200 °C соответственно) и относительно большое время отклика (1 и 0.05 с соответственно). Позднее на этом принципе были разработаны датчики теплового потока, в которых термопары размещались на тонких полимерных пленках в виде фольги или полученных методом вакуумного напыления соответствующих металлов, что позволило повысить чувствительность и значительно сократить время отклика датчика [9–12].

К настоящему времени наиболее развитой является методика измерения теплового потока и его поверхностной плотности с помощью плоских преобразователей теплового потока генераторного типа [13].

Обзор имеющихся в продаже датчиков теплового потока, используемых для исследования процессов горения, и их основных характеристик представлен в работах [14, 15].

В 2009 г. швейцарская компания «greenTEG AG» разработала датчики теплового потока gSKIN® на основе термоэлемента из теллурида висмута (BiTe). Для измерения высокоинтенсивных тепловых потоков (до 200 кВт/м²) датчиками gSKIN® их необходимо прикреплять к металлическому водоохлаждаемому основанию, обеспечивающему интенсивное охлаждение радиатора.

Среди других производителей тепловых датчиков, имеющихся на рынке, следует отметить следующие компании: «Medtherm Co.» (США), «Hukseflux» (Нидерланды), «RdF Corporation» (США) и «Captec Entreprise» (Франция).

Для измерения тепловых потоков применяют также косвенные методы, основанные на измерении градиента температуры у поверхности горящего материала, что позволяет рассчитать величину теплового потока с учетом теплопроводности газовой среды. Этот метод использовался в работах [16–19]. Следует отметить, что указанный метод требует хорошего пространственного и временного разрешения при измерении градиента температуры (например, использование тонких термопар и сканера с большой скоростью их перемещения), а также знания точного значения коэффициента теплопроводности газовой среды.

В работах других авторов используются гетерогенные градиентные датчики теплового потока, которые представляют собой искусственно-анизотропные косослойные термоэлементы [20].

При исследовании горения полимеров в лабораторных условиях датчики теплового потока различных типов размещали как в непосредственном контакте с зоной пламени [21–24], так и вне ее [25].

В работах [23, 24] измеряли только суммарный тепловой поток на поверхности вертикальных пластин из полиметилметакрилата (ПММА) при распространении пламени снизу вверх, при этом использовали датчики теплового потока диаметром 9.5 и 25 мм. В [25] измеряли только радиационную составляющую теплового потока от распространяющихся вверх пламен с помощью стандартных датчиков теплового потока диаметром 25 мм, расположенных на значительном расстоянии (40 см) от образца ПММА. В работе [21] для исследования горения горизонтальной пластины из ПММА в чашечной горелке попеременно использовали датчик лучистого теплового потока и датчик полного потока диаметром 25 мм. Аналогичный подход был использован в [22] при сжигании образца в конфигурации, аналогичной конусному калориметру с диаметром датчиков от 6 до 25 мм. Таким образом, в этих исследованиях лучистый и полный тепловые потоки измерялись попеременно в отдельных экспериментах. При таком подходе возможны ошибки в определении кондуктивного теплового потока, вычисляемого по разнице между полным и лучистым тепловыми потоками, так как добиться полностью идентичных условий в нескольких однотипных экспериментах довольно сложно.

Мы не нашли в литературе работ, в которых датчики тепловых потоков использовались бы для измерения лучистых и полных тепловых потоков при горизонтальном распространении пламени по поверхности полимера.

В случае размещения датчиков теплового потока непосредственно в образце полимера важным параметром является размер этих датчиков, так как от него зависят возмущения зоны горения за счет теплоотвода (большинство датчиков используются с водяным охлаждением).

Как видно из приведенных выше работ, размер наиболее часто используемых датчиков теплового потока составляет 25 мм, что в случае пламени с узкой зоной горения или большим градиентом температуры может привести к существенной погрешности измерений.

Использование датчиков теплового потока

минимальных размеров представляет практический интерес, так как миниатюризация позволяет с более высокой точностью характеризовать процесс теплообмена при распространении пламени по топливным материалам. Таким образом, целью настоящей работы было: 1) разработать конструкцию малогабаритного водоохлаждаемого датчика теплового потока для введения в зону горения, 2) измерить суммарный и радиационный тепловые потоки в зоне горения полимера при горизонтальном распространении пламени по поверхности полимера.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

1.1. Конструкция датчика и методика измерения тепловых потоков

Для измерения кондуктивного и радиационного тепловых потоков из пламени на поверхность полимера при его распространении по полимерной пластине была спроектирована и изготовлена установка, схема которой представлена на рис. 1.

Интенсивность лучистого теплового потока измерялась непосредственно датчиком теплового потока. Величина падающего кондуктивного теплового потока измерялась следую-

щим образом: 1) по градиенту температуры в пламени вблизи поверхности горения, измеренной термопарой (11); 2) по результатам измерения полного теплового потока (суммы лучистого и кондуктивного тепловых потоков) и радиационного теплового потока датчиком, рабочая поверхность которого располагалась на одном уровне с поверхностью полимера.

Для проведения измерений полимерную пластину (1) помещали на теплоизоляционную плиту из гипсокартона (3). В теплоизоляционной плите и полимере было сделано отверстие, через которое вставлен датчик теплового потока, представляющий собой термоэлемент (4), закрепленный на водоохлаждаемом радиаторе (6). Датчик теплового потока был жестко закреплен в корпусе установки (9). Датчик имел отверстия для подключения шлангов подачи охлаждающей воды (7) и электрические клеммы (8) для присоединения к аналого-цифровому преобразователю (ADC E-14-140-M фирмы L-CARD). Теплоизоляционная плита и полимерная пластина могли перемещаться вертикально относительно корпуса установки с помощью четырех винтов (5), что позволяло закрепить верхние поверхности датчика теплового потока и полимерной пластины. Во время экспериментов температура окружающего воздуха составляла 22 °С, атмосферное давление 745 мм рт. ст., внешний воздушный поток отсутствовал.

Профили температуры измерялись микро-термопарой диаметром 0.05 мм (11), установленной на 3D-сканере (12). Для управления траекторией движения термопары и измерения температуры использовалась специально разработанная программа, представляющая собой последовательность управляющих команд в виде G-Code. Эта программа транслировалась с компьютера в управляющую плату 3D-сканера с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом Printron [26]. Скорость движения термопары к поверхности полимера составляла 2 мм/с, что соответствовало шагу измерения температуры 0.22 мм в направлении, перпендикулярном поверхности полимера.

Профили интенсивности теплового потока определялись путем измерения интенсивности сигналов соответствующих датчиков в зависимости от времени с помощью АЦП и компьютера с учетом измеряемой в эксперименте скорости распространения фронта пламени.

Для предотвращения распространения

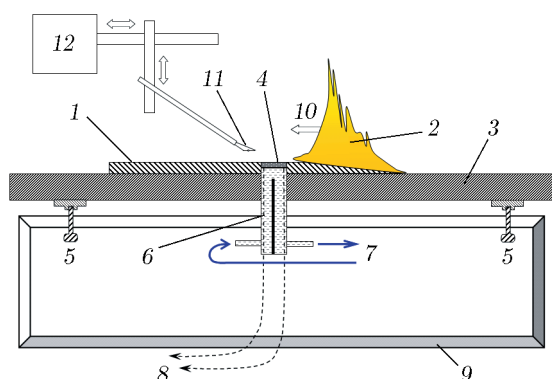


Рис. 1. Конфигурация установки для измерения тепловых потоков пламени на поверхность полимера:

1 — полимерная пластина, 2 — пламя, 3 — теплоизоляционная плита, 4 — датчик теплового потока, 5 — винты для регулировки высоты теплоизоляционной плиты над рамой установки, 6 — водоохлаждаемый радиатор для датчика, 7 — система водяного охлаждения, 8 — электрические выводы датчика, 9 — корпус установки, 10 — направление распространения пламени, 11 — термопара, 12 — 3D-сканер

пламени боковые стороны полимерной пластины были покрыты кварцевой тканью и вставлены в П-образный профиль из стальной фольги шириной 5 мм и толщиной 0.1 мм. При проведении измерений полимерная пластина поджигалась с одного края и пламя (2) распространялось по ее поверхности в направлении справа налево (10). По мере движения пламени по поверхности полимера и уменьшения толщины пластины верхняя поверхность датчика теплового потока стыковалась с поверхностью полимера с помощью винтов (5).

1.2. Конструкция датчика теплового потока

На рис. 2 показана схема датчика теплового потока. В качестве термочувствительного элемента использовались датчики теплового потока фирмы «greenTEG» (Цюрих, Швейцария, www.greenteg.com) двух модификаций: 1) gSKIN®-XP 27 9C, размер рабочей поверхности 10×10 и 5×5 мм; 2) gRAY® B0.5-SC, размер рабочей поверхности 2×2 мм (сенсор), площадь разработанного датчика 2.3×2.3 мм. Чувствительность указанных датчиков составляет ≈ 17 мкВ/(Вт/м²). Термочувствительные элементы (1) указанных выше модификаций приклеивались тонким слоем теплопроводящего клея АлСил-5 (2) на верхнюю поверхность водоохлаждаемого радиатора (3). Радиатор представляет собой миниатюрный сосуд из меди, через который с помощью термостата (4) прокачивалась вода с температурой 22 ± 2 °С. Конструкция радиатора предусматривает интенсивное охлаждение его верх-

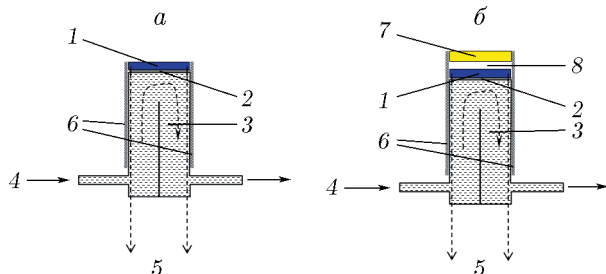


Рис. 2. Конструкция датчика теплового потока для измерения полного (а) и лучистого (б) тепловых потоков:

1 — термочувствительный элемент, 2 — теплопроводящий клей АлСил-5, 3 — водоохлаждаемый радиатор, 4 — питающая охлаждающая вода, 5 — электрические выводы термочувствительного элемента, 6 — слюдяные пластины, 7 — окно из ZnSe, 8 — воздушная прослойка



Рис. 3. Фотография датчика с размерами рабочей поверхности 2.3×2.3 мм для измерения кондуктивных и лучистых тепловых потоков

ней поверхности за счет перегородки внутри него, обеспечивающей высокую скорость потока воды у стенки верхней поверхности радиатора. Боковые поверхности термоэлемента и водоохлаждаемого радиатора защищены тонкими пластинами слюды, склеенными термостойким силиконовым клеем, для повышения точности измерений. Конструкция датчика обеспечивает угол обзора 180° .

При измерении радиационного теплового потока над датчиком устанавливалось окно из ZnSe толщиной 2.0 мм для датчиков gSKIN®-XP 27 9C или 0.5 мм для датчиков gRAY® B0.5-SC, закрепленное на слюдяных пластинах термостойким силиконовым клеем. Между окном из ZnSe и поверхностью термоэлемента был оставлен воздушный зазор шириной 1.5 мм для уменьшения вклада кондуктивного теплового потока от пламени. Конструкция датчика с окошком из ZnSe обеспечивает угол обзора около 150° .

На рис. 3 представлена фотография датчиков с размерами рабочей поверхности 2.3×2.3 мм для измерения кондуктивных и лучистых тепловых потоков.

1.3. Методика калибровки датчиков теплового потока

Для калибровки датчиков теплового потока использовали эталонный измеритель средней мощности лазера ИМО-2Н и полупроводниковый лазер с длиной волны 450 нм. Сначала с помощью измерителя ИМО-2Н измерялась средняя мощность излучения полупроводникового лазера, которая составила 1.50 ± 0.8 Вт.

Затем лазерное излучение фокусировалось на поверхность термоэлемента датчика теплового потока с помощью линзы и аттенюатора (вращающийся диск с прорезями, коэффициент ослабления 1 : 10), а цифровым вольтметром регистрировали сигнал от термоэлемента датчика. Полученный калибровочный коэффициент использовался для расчета интенсивности теплового потока. Относительная погрешность измерения величины теплового потока составила $\pm 0.5\%$, что было оценено путем сравнения полученного калибровочного коэффициента для термоэлемента gSKIN®-XP 27 9C и заявленного производителем в характеристиках датчика ($16.77 \text{ мкВ}/(\text{Вт}/\text{м}^2)$).

При измерении лучистого теплового потока учитывался коэффициент пропускания излучения через окно из ZnSe. Этот материал имеет высокий и практически постоянный коэффициент пропускания в диапазоне длин волн $0.5 \div 22 \text{ мкм}$. Для его определения на датчик направлялся тепловой поток от панели электрообогрева и измерялась величина сигнала от датчика с установленным на нем окном из ZnSe и без него. Значение коэффициента пропускания излучения окном из ZnSe толщиной 2.0 мм составило 0.70 ± 0.03 .

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОвого ПОТОКА ТЕРМОПАРОЙ

В [19] обсуждались профили температуры пламени, измеренные микротермопарой при горении горизонтально расположенной пластины ПММА толщиной 4.6 мм, длиной 200 мм и шириной 100 мм. На основании этих данных были рассчитаны градиенты температуры вблизи поверхности горения (рис. 4, кривая $\frac{dT}{dy}$) вдоль центральной линии образца, а затем оценено распределение величины кондуктивного теплового потока (рис. 4, кривая q_{con}) по поверхности ПММА, при этом среднее значение теплопроводности газовой среды вблизи поверхности полимера составляло $0.056 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. В данном исследовании относительная погрешность оценки кондуктивного теплового потока таким методом находится в диапазоне $25 \div 30\%$, так как температура вблизи поверхности горения ПММА в [19] практически не меняется вдоль зоны горения и равна $\approx 400 \div 450^\circ\text{C}$, а в состав газа у поверхности в основном входят только метилметакрилат (продукт разложения ПММА) и азот.

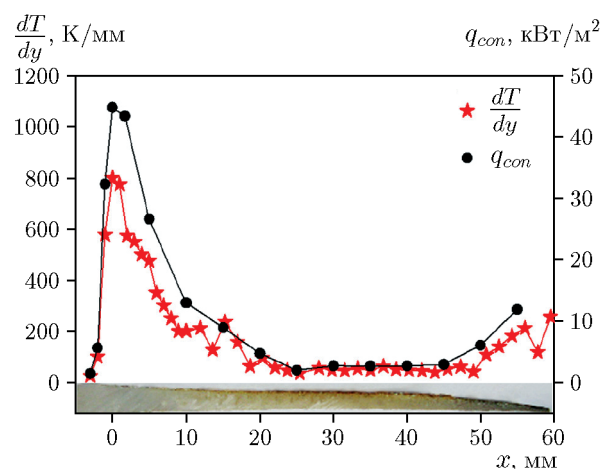


Рис. 4. Зависимости градиентов температуры и кондуктивного теплового потока в пламени от расстояния до фронта пламени при горении пластины ПММА толщиной 4.6 мм [17]



Рис. 5. Зависимости плотности полного, радиационного и кондуктивного тепловых потоков от расстояния до фронта пламени при горении литой пластины ПММА толщиной 4.6 мм, измеренные датчиком размеров $2.3 \times 2.3 \text{ мм}$:

для полного и радиационного тепловых потоков приведены сглаженные экспериментальные данные

На рис. 5 представлены результаты измерения плотности радиационного и полного тепловых потоков разработанными в настоящей работе датчиками ($2.3 \times 2.3 \text{ мм}$). Координата $X = 0$ выбрана авторами как передний фронт пламени. При горизонтальном распространении пламени по твердому топливу выделяют две зоны реакции (передний и задний фронт пламени). Пиролизующееся горю-

чее топливо поступает из твердого материала, а окислитель — из окружающего воздуха. В области полного расходования кислорода и полного расходования топлива температура достигает максимума. По этой причине на переднем и заднем фронте пламени максимум температуры наблюдается вблизи поверхности горения. Это является причиной двугорбого распределения полного теплового потока. Из рис. 5 видно, что лучистый тепловой поток начинает расти вдали от фронта пламени, в зоне горения его величина практически постоянна и примерно равна 20 кВт/м^2 . Погрешность измерения теплового потока по осреднению данных составляет 5 %. Полученные данные по радиационному и полному тепловым потокам позволяют рассчитать кондуктивный тепловой поток (как разность между плотностями полного и лучистого тепловых потоков), максимальное значение которого во фронте пламени составляет $\approx 48 \text{ кВт/м}^2$, а в середине зоны горения оно снижается до $4 \div 5 \text{ кВт/м}^2$. Таким образом, основной вклад в теплопередачу от пламени к несгоревшему топливу в зоне предварительного подогрева (на расстоянии $60 \div 10 \text{ мм}$ от фронта пламени) вносит лучистый тепловой поток, а во фронте пламени — кондуктивный теплообмен, в то время как в середине зоны горения преобладает лучистый тепловой поток.

Полученные экспериментальные данные согласуются с результатами экспериментов и расчетов из [27], где с помощью микротермопар R-типа были оценены вклады лучистого, конвективного и суммарного тепловых потоков в центре зоны пиролиза (зоны горения) при горизонтальном распространении пламени над экструдированным ПММА. Нужно отметить, что из-за приповерхностной вязкости конвективный тепловой поток, оцененный в [27], отсутствует, тогда как кондуктивный тепловой поток, т. е. молекулярный перенос тепловой энергии за счет столкновения молекул и диффузии в [27] не оценен. С помощью разработанной модели авторы [27] подтвердили результаты измерений. При размере пластины $4.4 \times 100 \text{ мм}$ результаты их измерений составили: лучистый тепловой поток — $10 \div 11 \text{ кВт/м}^2$ (по нашим данным с использованием датчика $2.3 \times 2.3 \text{ мм}$ примерно 15 кВт/м^2 , рис. 5), конвективный тепловой поток — менее 1 кВт/м^2 (по нашим данным кондуктивный тепловой поток $\approx 5 \text{ кВт/м}^2$), а полный тепловой поток — $11 \div 13 \text{ кВт/м}^2$ (по нашим дан-

ным $\approx 20 \text{ кВт/м}^2$) в середине зоны пиролиза. С учетом того, что скорость распространения и объем пламени литого ПММА, который мы использовали в данной работе, больше, чем у экструдированного ПММА в [19], экспериментально измеренные значения теплового потока в данной работе близки, но выше, чем в [27].

Данные по распределению интенсивности кондуктивного теплового потока, полученные с помощью датчика теплового потока (см. рис. 5), в пределах точности измерения согласуются с результатами его оценки по данным микротермопарных измерений (см. рис. 4). Однако следует отметить, что приведенные на рис. 4 оценки теплового потока в конце зоны горения ($40 \div 60 \text{ мм}$) занижены, так как по мере горения пластины ПММА поверхность горения смещалась вниз, тогда как диапазон движения термопары в вертикальном направлении оставался постоянным, в результате чего расстояние между пламенем и областью измерения термопарой увеличивалось. При измерении тепловых потоков эффект движения поверхности горения компенсировался постепенным поднятием уровня теплоизоляционной плиты (3) с помощью винтов (5), показанных на рис. 1, относительно неподвижного датчика по мере движения фронта пламени вдоль горизонтально расположенной пластины ПММА. При этом профиль интенсивности теплового потока имеет два экстремума (на переднем и заднем фронте пламени), достаточно близких по величине (см. рис. 5), тогда как на профиле теплового потока, полученного по результатам измерений с помощью микротермопар (см. рис. 4), второе максимальное значение (на заднем фронте пламени) в четыре раза меньше (близко к нулю), чем на переднем фронте пламени. Этот факт свидетельствует о том, что методика измерения тепловых потоков из пламени на поверхность полимеров с помощью разработанного датчика является более удобной и точной, чем методика, основанная на измерениях микротермопарами.

Для случая распространения пламени по поверхности полимера ПММА был проведен аналитический расчет теплового потока от пламени к поверхности полимера, который сравнивался с тепловым потоком, измеренным с помощью датчика (см. рис. 5). Связь между удельной массовой скоростью горения (specific mass burning rate — SMBR) и полным удельным тепловым потоком $q_{tot} [\text{Вт/м}^2]$, падающим

на поверхность или выходящим с поверхности, определяется следующим образом [27]:

$$\text{SMBR}[H_p + c_p(T_p - T_0)] = q_{tot}, \quad (1)$$

где H_p — теплота пиролиза (1020 Дж/кг [19]); c_p — удельная теплоемкость (1465 Дж/(кг·К) [28]); T_p — температура поверхности (680 К [19]); T_0 — температура окружающей среды (293 К).

Связь между удельной массовой скоростью сгорания топлива и скоростью распространения пламени вблизи фронта пламени определяется формулой [29]

$$\text{SMBR} = \rho_s v_f, \quad (2)$$

где v_f — скорость пламени (0.09 мм/с [19]), ρ_s — плотность твердого тела (1160 кг/м³ [19]).

Подставив (2) в (1), находим значение плотности теплового потока во фронте пламени: ≈ 59.5 кВт/м². Пренебрегая тепловым потоком, направленным от поверхности, эту величину можно считать равной падающему тепловому потоку. На рис. 5 во фронте пламени плотность полного теплового потока от пламени к поверхности ПММА составляет ≈ 67 кВт/м², что с учетом погрешности эксперимента, а также приближенности оценки (1) удовлетворительно согласуется с расчетом по аналитической формуле (1). Это свидетельствует в пользу правильности измерений датчиком теплового потока. Таким образом, разработанная методика измерения интенсивности теплового потока, находящегося в зоне горения, с помощью разработанного датчика теплового потока может помочь в анализе и разработке механизма термического разложения и горения полимеров.

На рис. 6 показаны профили плотности полного теплового потока, измеренные датчиками разных размеров. На профиле, измеренном датчиком 10×10 мм, имеется только один максимум с плохим разрешением, а на профиле, измеренном датчиком 5×5 мм, — два максимума (на переднем и заднем фронте пламени), максимальная плотность суммарного теплового потока составила ≈ 42 кВт/м². При измерении датчиком 2.3×2.3 мм получен профиль с двумя пиками; максимальная плотность суммарного теплового потока составила $q_{tot} \approx 69$ кВт/м². Измерения миниатюрными (2.3×2.3 мм) датчиками лучше согласуются с оценкой (1) и результатами измерений [19], чем

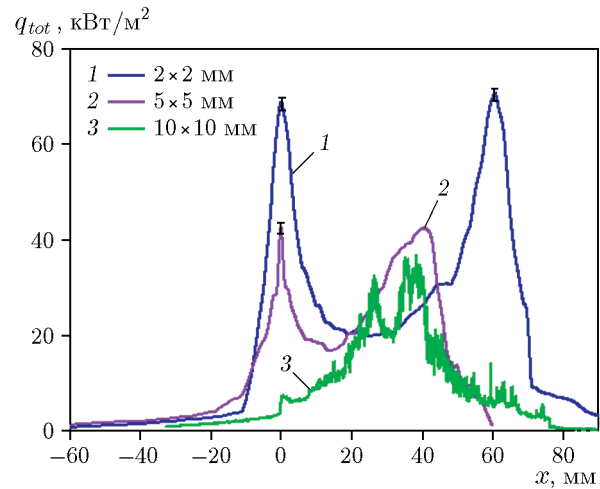


Рис. 6. Зависимости плотности полного теплового потока от расстояния до фронта пламени при горении литой пластины ПММА толщиной 4.6 мм, измеренные с помощью датчиков различных размеров

измерения большими датчиками. Таким образом, нами впервые показано, что при изучении тепловой структуры пламени полимеров при горизонтальном распространении пламени по ним наиболее точные и согласованные результаты по профилям тепловых потоков получаются при использовании разработанных нами миниатюрных датчиков теплового потока размером 2.3×2.3 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны датчики для измерения суммарного и радиационного тепловых потоков на базе датчиков теплового потока greenTEG AG типоразмеров 2.3×2.3 , 5×5 и 10×10 мм, с модернизированной системой теплоотвода, размещенной на водоохлаждаемом радиаторе. Показано, что с уменьшением размеров датчиков повышается точность измерения суммарных тепловых потоков при горизонтальном распространении пламени по полимеру.

2. Миниатюризация датчиков теплового потока, размещенных на водоохлаждаемом радиаторе и встроенных в полимерную пластину, позволила впервые провести измерения полного и радиационного тепловых потоков в зоне горения полимера при горизонтальном распространении пламени по поверхности полимера.

3. Встраивание в полимерную пластину максимально близко друг к другу миниатюрных датчиков тепловых потоков размером

2.3 × 2.3 мм позволяет определить величину кондуктивного теплового потока в зоне горения полимера как разность между значениями плотности полного и радиационного потоков тепла.

4. Получение более точных значений интенсивности радиационного и кондуктивного тепловых потоков поможет уточнить механизм термического разложения и горения полимеров, а также будет способствовать разработке и обоснованию более точных моделей горения полимеров.

Авторы благодарят проф. С. Бурбиго за плодотворное обсуждение и ценные рекомендации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00295).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Jiang L., Xiao H., Zhou Y., An W., Yan W., He J., Sun J. Theoretical and experimental study of width effects on horizontal flame spread over extruded and expanded polystyrene foam surfaces // *J. Fire Sci.* — 2013. — V. 32, N 3. — P. 193–209. — DOI: 10.1177/0734904113505677.
- Karpov A. I., Korobeinichev O. P., Shaklein A. A., Bolkisev A. A., Kumar A., Shmakov A. G. Numerical study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // *Appl. Therm. Eng.* — 2018. — V. 144. — P. 937–944. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.106.
- McCoy C. G., Tilles J. L., Stoliarov S. I. Empirical model of flame heat feedback for simulation of cone calorimetry // *Fire Saf. J.* — 2019. — V. 103. — P. 38–48. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2018.11.006.
- Korobeinichev O. P., Kumaran S. M., Shanmugasundaram D., Raghavan V., Trubachev S. A., Paletsky A. A., Shmakov A. G., Glaznev R. K., Chernov A. A., Tereshchenko A. G. Experimental and numerical study of flame spread over bed of pine needles // *Fire Technol.* — 2021. — V. 58, N 3. — P. 1227–1264. — DOI: 10.1007/s10694-021-01190-2.
- Snegirev A. Yu., Kuznetsov E. A., Korobeinichev O. P., Shmakov A. G., Trubachev S. A. Ignition and burning of the composite sample impacted by the Bunsen burner flame: A fully coupled simulation // *Fire Saf. J.* — 2022. — V. 127. — 103507. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103507.
- Gardon R. An instrument for the direct measurement of intense thermal radiation // *Rev. Sci. Instrum.* — 1953. — V. 24, N 5. — P. 366–370. — DOI: 10.1063/1.1770712.
- Геращенко О. А. Основы теплотрии. — Киев: Наук. думка, 1971.
- Kidd C. T., Nelson C. G. How the Schmidt — Boelter gage really works // *Proc. 41st Int. Instrum. Symp., Research Triangle Park, NC: ISA.* — 1995. — V. 26, N 23. — P. 347–368.
- Ortolano D. J., Hines F. F. A simplified approach to heat flow measurement // *Adv. Instrum. Res. Triangle Park: ISA.* — 1983. — V. 38, Pt II. — P. 1449–1456.
- Hager J. M., Onishi S., Langley L. W., Diller T. E. High temperature heat flux measurements // *AIAA J.* — 1993. — V. 7. — P. 531–534. — DOI: 10.2514/6.1991-165.
- Holmberg D. G., Diller T. E. High-frequency heat flux sensor calibration and modeling // *J. Fluids Eng.* — 1995. — V. 117, N 4. — P. 659–664. — DOI: 10.1115/1.2817319.
- Terrell J. P. New high sensitivity, low thermal resistance surface mounted heat flux transducer // *Proc. 42nd Int. Instrum. Symp., Research Triangle Park, NC: ISA.* — 1996. — P. 235–249.
- Декуша Л. В., Грищенко Т. Г., Менделеева Т. В. Теоретические основы метрологии топочных процессов // *Пром. теплотехника.* — 2001. — № 4-5. — С. 175–180.
- Diller T. E. Advances in heat flux measurements // *Adv. Heat Transfer.* — 1993. — V. 23. — P. 279–368. — DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70008-X.
- Arai N., Matsunami A., Churchill S. W. A review of measurements of heat flux density applicable to the field of combustion // *Exp. Therm. Fluid Sci.* — 1996. — V. 12, N 4. — P. 452–460. — DOI: 10.1016/0894-1777(95)00136-0.
- Singh A. V., Gollner M. J. A methodology for estimation of local heat fluxes in steady laminar boundary layer diffusion flames // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 5. — P. 2214–2230. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.01.019.
- Ito A., Kashiwagi T. Temperature measurements in PMMA during downward flame spread in air using holographic interferometry // *Proc. Combust. Inst.* — 1988. — V. 21, N 1. — P. 65–74. — DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80232-7.
- Rakesh Ranga H. R., Korobeinichev O. P., Harish A., Raghavan V., Kumar A., Gerasimov I. E., Gonchikzhapov M. B.,

- Tereshchenko A. G., Trubachev S. A., Shmakov A. G.** Investigation of the structure and spread rate of flames over PMMA slabs // *Appl. Therm. Eng.* — 2018. — V. 130. — P. 477–491. — DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.041.
19. **Korobeinichev O., Gonchikzhapov M., Tereshchenko A., Gerasimov I., Shmakov A., Paletsky A., Karpov A.** An experimental study of horizontal flame spread over PMMA surface in still air // *Combust. Flame.* — 2018. — V. 188. — P. 388–398. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.10.008.
20. **Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В.** Основы градиентной теплометрии. — СПб.: Изд-во С.-Петербур. политехн. ун-та, 2012.
21. **Kacem A., Mense M., Pizzo Y., Boyer G., Suard S., Boulet P., Parent G., Porterie B.** A fully coupled fluid/solid model for open air combustion of horizontally-oriented PMMA samples // *Combust. Flame.* — 2016. — V. 170. — P. 135–147. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.04.009.
22. **Beaulieu P. A., Dembsey N. A.** Effect of oxygen on flame heat flux in horizontal and vertical orientations // *Fire Saf. J.* — 2008. — V. 43. — P. 410–428. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2007.11.008.
23. **Leventon I. T., Li J., Stoliarov S. I.** A flame spread simulation based on a comprehensive solid pyrolysis model coupled with a detailed empirical flame structure representation // *Combust. Flame.* — 2015. — V. 162, N 10. — P. 3884–3895. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.07.025.
24. **Tsai K.-C.** Influence of sidewalls on width effects of upward flame spread // *Fire Saf. J.* — 2011. — V. 46, N 5. — P. 294–304. — DOI: 10.1016/j.firesaf.2011.03.006.
25. **Chen X., Liu J., Zhou Z., et al.** Experimental and theoretical analysis on lateral flame spread over inclined PMMA surface // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2015. — V. 91. — P. 68–76. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.072.
26. **Kliment.** PRINTRUN 2.X: Python. — 2022. — <https://github.com/kliment/Printrun>. — (Accessed 06.02.2023).
27. **Jiang L., Miller C. H., Gollner M. J., Sun J.-H.** Sample width and thickness effects on horizontal flame spread over a thin PMMA surface // *Proc. Combust. Inst.* — 2017. — V. 36, N 2. — P. 2987–2994. — DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.157.
28. **Korobeinichev O. P., Trubachev S. A., Joshi A. K., Kumar A., Paletsky A. A., Tereshchenko A. G., Shmakov A. G., Glaznev R. K., Raghavan V., Mebel A. M.** Experimental and numerical studies of downward flame spread over PMMA with and without addition of tri phenyl phosphate // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 3. — P. 4867–4875. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.07.082.
29. **Jiang L., Xiao H., Zhou Y., et al.** Theoretical and experimental study of width effects on horizontal flame spread over extruded and expanded polystyrene foam surfaces // *J. Fire Sci.* — 2013. — V. 32, N 3. — P. 193–209. — DOI: 10.1177/0734904113505677.

Поступила в редакцию 21.12.2022.

После доработки 06.04.2023.

Принята к публикации 24.05.2023.