

# ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ

А.М. Шиляев, Г.Г. Волокитин, И.А. Лысак, П.В. Сорокин

Технологические процессы во многих отраслях промышленности нередко связаны с использованием в производстве высокотемпературных теплоносителей. Это вызывает необходимость применения теплоизоляционных материалов высокого качества, например, для футеровки сушильных и нагревательных устройств, обкладки печей, изоляции котельных установок и т.п.

Общим направлением научно-технических разработок в промышленном и коммунальном строительстве является снижение материалоемкости и энергоемкости при создании новых видов материалов и конструкций с более высокими эксплуатационными характеристиками. Для теплоизолирующих материалов основным показателем является коэффициент теплопроводности в диапазоне их рабочих температур.

Строительной отрасли требуются новые материалы, имеющие низкий коэффициент теплопроводности. Создание легких и низкопроводящих материалов на основе отходов энергетических производств (зольная микросфера) позволяет уменьшить затраты связанные с использованием дорогостоящего сырья, значительно сократить массу зданий и сооружений, облегчив нагрузку на фундаменты, снизить трудовые затраты на возведение и эксплуатацию высокотемпературных объектов. При разработке новых теплоизоляционных и конструкционных материалов на стадии подбора состава сырья и отработки режимов формования и обжига требуется неоднократное определение теплопроводности получаемых образцов.

Методы определения теплопроводности в большинстве своем связаны с определенным режимом нагрева исследуемого материала. Стационарные методы, например, «метод неограниченного теплового слоя» [1], или же методы, основанные на закономерностях регулярного теплового режима [2], позволяют получить удовлетворительную точность результатов, но, в то же время, связаны со значительными затратами времени и энергии для проведения опытов, а при определении теплофизических коэффициентов

при высоких температурах практически нереализуемы.

Современные скоростные методы определения теплопроводности основаны на закономерностях нестационарного распространения теплового поля в теле исследуемого материала. К ним можно отнести методы, использующие нагрев материала импульсными источниками тепла [3, 4]. Хотя эти методы позволяют за меньшее время, по сравнению со стационарными методами, определять теплофизические характеристики (ТФХ) материалов, но для оценки ТФХ в широком диапазоне температур либо требуют значительных затрат времени, либо они не в состоянии обеспечить достаточную точность.

В последнее время в теории и практике исследования процессов теплообмена интенсивно развивается новое направление, основанное на принципах обратных задач теплопроводности (ОЗТ) [5]. При этом развитие вычислительной техники дает возможность использования этих принципов для разработки скоростных методов по определению теплопроводности материалов.

Методы, основанные на решении ОЗТ, используются в современной теплоэнергетике пока что меньше, чем стационарные. Но наличие быстродействующих вычислительных машин с большой памятью создало хорошую основу для практического использования методик на основе ОЗТ.

В связи с этим целью настоящей работы являлась разработка и практическая реализация экспресс метода определения коэффициента теплопроводности строительных композиционных материалов в широком диапазоне температур на основе решения ОЗТ.

В рамках поставленной цели решались задачи разработки и создания автоматизированного измерительного комплекса для диагностики параметров плазменного потока и определения теплопроводности строительных композиционных материалов, а также реализации, с его помощью, экспресс метода определения теплопроводности строительных композиционных материалов на основе решения обратных задач теплопроводности.

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ

Наиболее скоростные методы определения теплопроводности предполагают импульсный нагрев исследуемого материала.

Импульсный нагреватель должен быть химически инертен, обеспечивать постоянство теплового воздействия в импульсе, обладать низкой инерционностью. С учетом этих требований в качестве источника тепла выбран струйный плазмотрон линейной схемы с гладким выходным электродом.

В лаборатории НИИ СМ при ТГАСУ «Плазменные процессы и аппараты» создан автоматизированный измерительный комплекс (рис. 1) состоящий из плазмотрона 1, позволяющего генерировать плазменный поток в диапазоне температур 3000 – 5000 К, источника постоянного тока ИПН-160/600 2, системы газоснабжения 10, 12, 15, водоохлаждения 11, 13, 14, 16, 17, вентиляции 18, координатного устройства 7, обеспечивающего перемещение и позиционирование датчиков 3 - 6 и блока автоматической регистрации и контроля на базе микро ЭВМ.

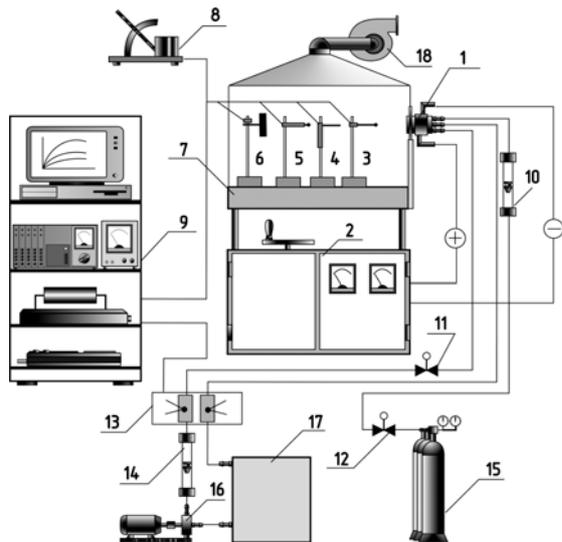


Рис. 1. Автоматизированный измерительный комплекс: 1 – плазмотрон; 2 – источник питания ИПН 160/600; 3 – термодатчик; 4 – трубка Пито; 5 – датчик плотности теплового потока; 6 – опытный образец; 7 – координатное устройство; 8 – микроанометр; 9 – автоматическая система регистрации; 10 и 14 – ротаметры; 11 и 12 – вентили; 13 – блок контроля температуры охлаждающей воды; 15 – система газоснабжения с баллонами высокого давления; 16 – центробежный насос; 17 – бак оборотного водоснабжения; 18 – вентиляция с местным отсосом

Разработка метода, использующего плазменные устройства, требует знания основных характеристик генерируемых ими высокотемпературных газовых потоков. Автоматизация исследований высокотемпературного теплообмена имеет важное значение для получения и обработки результатов. Применение средств автоматизации позволяет значительно сократить время, требуемое для получения необходимой информации об изучаемом процессе, увеличить ее полноту и обеспечить легкость анализа. Ведущая роль в этом отводится средствам вычислительной техники.

Известно, что наиболее простыми и удобными являются контактные методы измерения температур. При этих методах чувствительный элемент (ЧЭ) помещается в измеряемую среду и, следовательно, определяется температура ЧЭ, а не среды. Контактные методы диагностики в условиях высоких температур основаны на измерении нестационарных (изменяющихся во времени) температур чувствительного элемента (датчика температуры - королька термпары, датчика теплового потока - пластинки или цилиндра, заделанных в исследуемый образец).

Можно рассмотреть процесс нагрева тела чувствительного элемента (ЧЭ) при следующих условиях.

1. Температура газового потока  $T_{жс}$  не изменяется во времени.

2. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  является неизменной во времени величиной.

3. Внутренние источники тепловыделения в теле образца (ЧЭ) имеют нулевую мощность ( $W = 0$ ).

4. Начальное распределение температуры в теле образца (ЧЭ) может быть произвольным.

5. Разность между температурой в любой точке тела и температурой потока имеет один и тот же знак.

При этих условиях нестационарный процесс нагрева (охлаждения) может быть разделен на две стадии: начальную стадию и стадию регулярного теплового режима.

Первая стадия характеризуется тем, что изменение температуры во времени существенно зависит от начального распределения температуры в теле (теплового состояния ЧЭ). Здесь характер процесса не определяется однозначно условиями нагрева (охлаждения) и свойствами тела.

Во второй стадии постепенно влияние начальных условий все более и более утрачивается. Воздействие условий нагрева и свойств материала тела ЧЭ становится определяющим. Наступает регулярный тепловой режим (РТР).

При этом закон изменения температурного поля во времени принимает простой и универсальный вид: логарифм избыточной температуры ( $\theta = |T - T_{жс}|$ ) тела в любой точке изменяется по линейному закону

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = m_{\lambda} (T_{жс} - T).$$

Скорость нарастания температуры пропорциональна разности температур между телом ЧЭ и средой омывающего потока. Так же можно записать

$$-\frac{\partial [\ln(T_{жс} - T)]}{\partial \tau} = m_{\lambda}.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$T = T_{жс} - C \cdot e^{-m_{\lambda} \tau}, \quad (1)$$

то есть температура во времени изменяется по экспоненциальному закону. Здесь  $C$ , °С - константа интегрирования.

Величина  $m_{\lambda}$ , 1/с, есть положительное число, не зависящее от координат и времени. Это темп нагрева, величина обратная времени тепловой релаксации ЧЭ

$$m_{\lambda} = \frac{1}{\tau_{\lambda}}.$$

Поскольку плазменная техника применяется, в основном, в тех случаях, когда необходим нагрев газа до температур выше 2000 °С, и немногие материалы могут продолжительное время находиться в такой высокотемпературной среде без разрушения или плавления, то для контактной диагностики целесообразно использовать нестационарные методы определения температуры потока. В связи с высокой интенсивностью теплообмена плазменной струи с внесенным в нее чувствительным элементом термодатчика есть все основания применять закономерности регулярного режима нагрева тела правильной формы (сферического королька спая термопары) для прогнозирования с высокой точностью истинной температуры набегающего газа при кратковременном внесении датчика в поток. Причем время нахождения датчика в высокотемпературной зоне может быть много меньшим времени выхода процесса нагрева на стационарный режим.

Схема устройства термодатчика приведена на рис. 2 а. Закрепленный на перемещающейся каретке координатного устройства датчик в автоматическом режиме быстро вводится в поток и останавливается. Место остановки фиксируется контактной группой и соответствует оси плазменной струи. Время выдержки устанавливается в соответствии с ожидаемым уровнем максимальной темпера-

туры в исследуемом сечении плазменной струи. В момент остановки драйвер-программа системы регистрации измерений начинает считывать информацию, приходящую от ЧЭ термодатчика. По завершении времени выдержки каретка быстро возвращает измерительное устройство в исходное положение. Процесс измерения завершен.

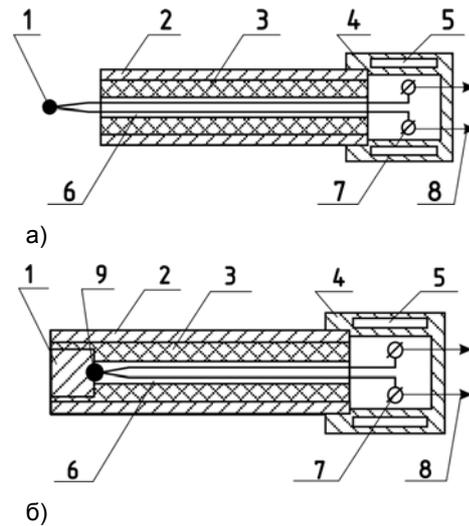


Рис. 2. Измерительные датчики: а - датчик температуры; б - экспоненциальный датчик плотности теплового потока; 1 - чувствительный элемент; 2 - трубка из коррозионноустойчивой стали; 3 - теплоизолирующая втулка; 4 - водоохлаждаемый кожух; 5 - канал потока охлаждающей воды; 6 - канал термопары; 7 - «холодные» концы термопары; 8 - провода к автоматизированной измерительной системе; 9 - корольки термопары ХА

В памяти компьютера после проведения измерений находится массив дискретных значений функции  $T = f(\tau)$ , который может быть представлен в виде графика, показанного на рис. 3.

Аппроксимация экспериментальных точек, расположенных во II зоне - зоне РТР функцией вида

$$T = C_1 - C_2 \cdot e^{-C_3 \tau} \quad (2)$$

позволяет получить значения коэффициентов  $C_1, C_2, C_3$ . Сравнение формул (2) и (1) говорит о том, что величина коэффициента  $C_1$  определяет значение искомой температуры плазменного потока в исследуемом сечении струи, а величина коэффициента  $C_3$  дает значение темпа нагрева в проведенном эксперименте.

Из графика (рис. 3) видно, что кривая 2 асимптотически стремится к горизонтальной линии, отвечающей температуре исследуемой среды - плазменного потока.

**ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ**

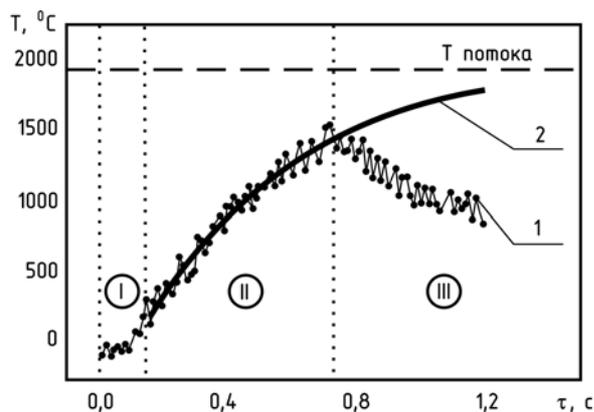


Рис. 3. Экспериментальная термограмма: 1 - экспериментальные точки, 2 - аппроксимация зависимостью (2), I - зона начальной стадии нагрева ЧЭ, II - зона стадии регулярного режима нагрева ЧЭ, III - зона охлаждения датчика после выведения его из потока

Согласно вышеизложенной методике по результатам проведенных измерений вычисляется температура при каждом измерении для исследуемого сечения плазменного потока.

Таким образом, установлено распределение температуры по оси плазменного потока, результаты представлены в виде графика на рис. 4, а. Относительная погрешность определения температуры плазменного потока с помощью термопары ВР 5/20 не превышает 5% [6].

Удельные тепловые потоки определялись с помощью датчиков теплового потока, изображенных на рис. 2. Широко известен и применяется экспоненциальный метод определения поверхностной плотности теплового потока [7]. Для реализации этого метода создан датчик, схема которого представлена на рис. 2,б. В качестве ЧЭ 1 этого датчика служит медный цилиндр диаметром 3 мм и высотой 5 мм. Термопара 9 типа ХА вплавлена в цилиндр так, чтобы центр спая находился на расстоянии 2,9 мм от тепловоспринимающей поверхности. Координата заделки спая соответствует координате точки средней температуры в процессе нагрева. Медный ЧЭ с термопарой и керамической (BeO) солодкой 3 вставлялся в трубку 2 из стали 10X18H9T и цементировался смесью асбоцемента и жидкого стекла таким образом, чтобы обеспечить тепло- и электроизоляцию заднего торца ЧЭ и его боковой поверхности. Внешний диаметр датчика – 6 мм. Свободные концы термопары охлаждаются на поверхности проточного холодильника 4.

Известно, что количество тепла  $Q$ , поступающее в твердое тело (пластина тощи-

ной  $h$ ) за время  $d\tau$  при малых значениях критерия Био ( $Bi < 0,01$ ) равно изменению его теплосодержания [7]

$$Q = mC_p dT, \quad (3)$$

где  $m$  – масса ЧЭ;  $C_p$  – удельная теплоемкость материала ЧЭ;  $dT$  – приращение средней температуры ЧЭ. Поделив обе части (3) на  $d\tau F$  ( $F$  – площадь тепловоспринимающей поверхности ЧЭ), получим

$$q = \rho C_p h \frac{dT}{d\tau},$$

где  $q$  – поверхностная плотность теплового потока;  $\rho$  – плотность материала ЧЭ. Для данного времени теплового воздействия  $\tau_*$  существует характерная толщина  $h_* = \sqrt{a\tau_*}$ , которая приближенно равна глубине проникновения теплового потока за это время [7]. Если толщина ЧЭ того же порядка, что и  $h_*$ , то некоторая часть тепла «успевает» за счет кондуктивного теплоотвода передаться всему датчику. Поэтому условием применимости такого метода определения удельного теплового потока является малость критерия Био, а также определенное значение критерия Фурье ( $Fo > 0,35$ ). Таким образом, для определения поверхностной плотности теплового потока можно использовать линейный участок зависимости средней температуры ЧЭ от времени  $T(\tau)$  в условиях регулярного теплового режима, который имеет место с момента времени

$$\tau_{\min} = \frac{0,35h^2}{a},$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности материала ЧЭ. Интервал времени максимально возможного линейного участка для заданного уровня теплового потока  $q$  равен [7]

$$\tau_{\max} = \frac{0,366\lambda\rho C_p T_{\max}^2}{q^2}$$

при оптимальной толщине ЧЭ

$$h_{\text{opt}} = \frac{T_{\max}\lambda}{1,36q}.$$

Здесь  $T_{\max}$  – максимально допустимая средняя температура ЧЭ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала ЧЭ. Учитывая то, что ЧЭ находится на теплоизолирующем слое, баланс тепла в ЧЭ можно записать в виде.

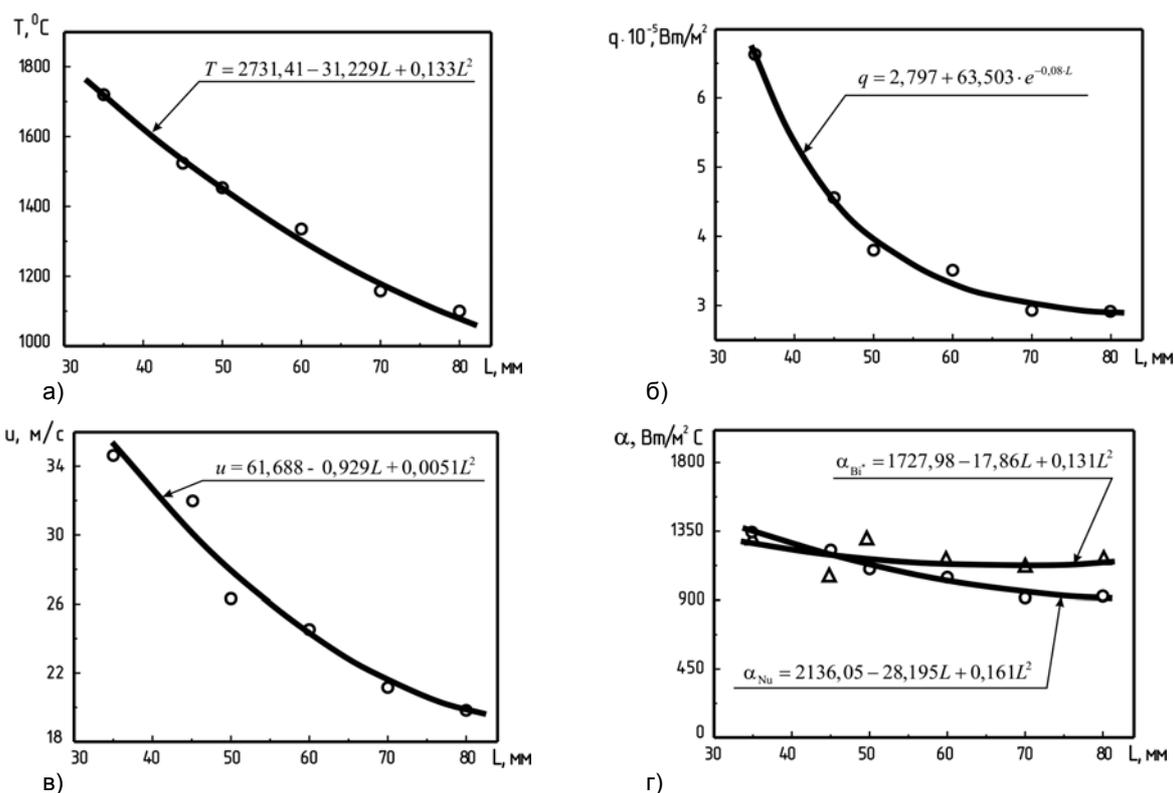


Рис. 4. Результаты определения основных характеристик плазменного потока: а - распределение температуры по оси плазменного потока; б - распределение удельной плотности теплового потока вдоль оси плазменной струи; в - распределение осевой скорости плазменного потока; г - сравнение результатов определения коэффициента теплоотдачи к сферической частице согласно зависимостям (8) и (10)

$$q(\tau) = hC_p\rho \frac{dT}{d\tau} + q_k(\tau) + q_r(\tau), \quad (4)$$

где  $q_k(\tau)$  - утечка тепла в теплоизоляцию;  $q_r(\tau) = \varepsilon^* s_0 T^4$  - радиационный тепловой поток от ЧЭ в окружающую среду;  $\varepsilon^*$  - интегральный показатель степени черноты поверхности ЧЭ;  $s_0$  - постоянная Стефана – Больцмана. Если известно, что температура поверхности ЧЭ  $T_w$  (а, следовательно, и средняя температура ЧЭ) изменяется во времени по закону

$$T(\tau) = d_n \tau^n + d_{n-1} \tau^{n-1} + \dots + d_1 \tau + d_0,$$

где  $d_0, d_1, \dots, d_n$  - полиномиальные коэффициенты, то для расчета стока тепла в теплоизолятор пригодна формула

$$q_k(\tau) = \sqrt{\frac{\rho_1 \lambda_1 (C_p)_1}{\pi \tau}} \sum_{m=0}^n \frac{(-1)^{m+1} m C_i^m}{2m-1}, \quad (5)$$

где  $\lambda_1, (C_p)_1, \rho_1$  - коэффициенты теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности материала теплоизолятора. Если ограничиться  $n = 3$ , то (5) можно записать в виде

$$q_k(\tau) = \sqrt{\frac{\rho_1 \lambda_1 (C_p)_1}{\pi \tau}} \left( \frac{8}{5} d_3 \tau^3 + \frac{4}{3} d_2 \tau^2 + d_1 \tau \right). \quad (6)$$

Относительная погрешность определения удельных тепловых потоков не превышает для этих датчиков 5%.

Результаты представлены на рис. 4,б.

За пределами сопла плазматрона отсутствуют ограничивающие струю поверхности, газовая струя истекает в газовую среду. В этом случае струя называется свободной.

Известны контактные (зондовые) и бесконтактные методы измерения скорости потока. Зондовыми методами скорость потока определяется косвенно по результатам динамического или теплового взаимодействия потока с ЧЭ зонда.

Достаточно просто реализуется метод определения скорости течения напорными трубками по замеренным полному и статическому давлению. Для замера полного давления используется трубка Пито круглого поперечного сечения. На трубке, имеющей форму затупленного тела, при помещении ее в поток образуется пограничный слой с неизотропным течением, вследствие чего изме-

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ

ренное в плоскости приемного отверстия  $P_{изм}$  не равно  $P$ . Различие между этими величинами оценивается по формуле

$$\frac{2(P_{изм} - P)}{\rho u^2} = 1 + \frac{5,6}{Re}, \quad (7)$$

где  $Re = \rho u d_n / \mu$  - число Рейнольдса,  $u$  - скорость набегающего потока,  $\rho$  - плотность газа,  $d_n$  - наружный диаметр трубки Пито,  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости газа. Для замера полного давления используется охлаждаемая или изготовленная из термостойкого материала трубка Пито.

По измеренным значениям  $h_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в одном фиксированном сечении струи определяется среднее значение по формуле  $h_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$ , где  $n$  - число измерений в одном опыте.

Величина средней скорости без учета сжимаемости газа в сечении вычисляется по закону Бернулли при найденных значениях  $h_{cp}$ .

Относительная погрешность определения скорости плазменного потока с помощью водоохлаждаемой трубки Пито не превышает 5%, распределение скорости плазменного потока вдоль своей оси представлено на рис. 4, в.

Коэффициент теплоотдачи плазменного потока к сферической частице (корольку термопары типа ВР 5/20) вычисляется двумя способами.

Первый предлагает определение коэффициента теплоотдачи в аспекте теплового состояния королька термопары в условиях РТР через модифицированное число Био

$$\alpha = Bi^* \frac{\pi^2 \cdot \lambda}{3R}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  и  $R$  - коэффициент теплопроводности и радиус королька термопары соответственно. Величина модифицированного числа Био  $Bi^*$  вычисляется согласно трансцендентному уравнению

$$Bi^* = \frac{m_\lambda \cdot R^2}{\pi^2 \cdot a} \sqrt{1 + 1,437 \cdot Bi^* + Bi^{*2}}, \quad (9)$$

где  $m_\lambda = C_3$  - темп нагрева (см. (1)), определенный при обработке экспериментальной термограммы,  $a$  - коэффициент температуропроводности материала спая термопары.

Уравнение (9) решается методом последовательных приближений.

Второй способ заключается в определении коэффициента теплоотдачи в условиях

вынужденной конвекции с учетом неизотермичности на основе критериальной зависимости [8]

$$Nu = 2 \frac{\lambda_{cm}}{\lambda_n} + 0,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,4} \left( \left( \frac{\rho_n \mu_n}{\rho_{cm} \mu_{cm}} \right)^{0,2} \right). \quad (10)$$

Здесь  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\rho$  - плотность;  $\mu$  - динамическая вязкость; индексы « $n$ » и « $cm$ » относятся к потоку и преграде соответственно;  $Re = \rho_{cm} u 2R / \mu_n$  - число Рейнольдса;  $Nu = \alpha 2R / \lambda$  - критериальное число Нуссельта;  $Pr = \mu C_p / \lambda$  - число Прандтля;  $u$  - скорость плазменного потока, определенная ранее. Коэффициент теплоотдачи определяется согласно зависимости

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{2R}.$$

Выполнено сравнение результатов определения коэффициента теплоотдачи к сферической частице согласно зависимостям (8) и (10) (рис. 4, г), получено соответствие результатов с погрешностью не более 10%, что позволяет говорить о работоспособности измерительного комплекса и дает возможность использовать его для определения теплофизических характеристик с достаточной точностью.

На основе результатов исследования параметров плазменного потока решена задача численного моделирования теплового состояния образца композиционного материала при воздействии на него высококонцентрированного потока плазмы. Двумерное уравнение теплопроводности

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (11)$$

аппроксимировалось согласно методу конечных разностей и решено методом прогонки с дробными шагами по времени.

В ходе численного эксперимента происходило накопление массива дискретных значений, характеризующих динамику температурного поля в теле образца. Это позволило получить представление о характере изменения температуры в теле образца, что при известных физических характеристиках материала дало возможность подобрать режимы проведения эксперимента по определению его теплопроводности. Например, для пластины  $120 \times 60$  мм материала обладающего плотностью  $\rho = 1200$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкостью  $C_{pm} = 1500$  Дж/(кг·К), толщиной  $h = 0,02$  м и с заделкой термодатчиков на глубине  $h_i$  равной 1, 2 и 3 мм от нагреваемой поверхности

предположим линейную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры  $\lambda = k_1(1+k_2T)$ , где  $k_1 = 0,5$ ,  $k_2 = -0,001$ . Тогда, при прохождении образца через плазменный поток плотностью  $q = 2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> в течение двух секунд максимальная температура на нагреваемой поверхности составит  $T = 724,26$  °С, что не приводит к плавлению большинства строительных материалов, а изменение температуры на «холодном» датчике № 3 более чем десятикратно превышает погрешность определения температуры. Значит, такие режимы проведения эксперимента по определению теплопроводности исследуемого материала можно считать удовлетворительными.

Выполнен расчетный тест решения ОЗТ. В качестве функционала использована невязка экспериментальных и расчетных значений температуры датчиков

$$J = \sum_{j=0}^N \sum_{i=1}^3 (T_{pij} - T_{эij})^2, \quad (12)$$

где  $j$  – номер текущей температуры;  $i$  – номер датчика;  $T_{pij}$  и  $T_{эij}$  – расчетные и экспериментальные значения температуры.

При этом за экспериментальные данные приняты результаты моделирования нагрева образца материала с заданными теплофизическими характеристиками, к которым применено нелинейное сглаживание по семи точкам на основе полинома третьей степени, промежуточные значения получены с помощью линейной интерполяции.

Для минимизации функционала (12) применен метод нерегулярных симплексов, не требующий вычисления градиентов температуры, что упрощает алгоритм расчета и позволяет значительно сократить время решения ОЗТ.

В процессе моделирования выполнена оценка влияния погрешностей, как заделки датчиков, так и регистрации температурных полей в теле образца, на точность определения коэффициента теплопроводности.

Это позволило установить, что для определения теплопроводности с погрешностью не более 10% необходимо выполнить следующие условия.

1. Допускаемая суммарная погрешность определения температуры, включающая погрешности термодатчиков, измерительного тракта, а также погрешности связанные с математической обработкой исходных данных, не должна превышать 25–30 %. Такая точность обеспечивается в процессе измерений.

2. Погрешность заделки наиболее близкого к нагреваемой поверхности датчика не должна превышать 5 %, что для координаты датчика 1 мм от нагреваемой поверхности образца составляет 0,05 мм. Это накладывает повышенные требования к точности позиционирования датчиков.

Для обеспечения второго условия сконструировано устройство на основе индикатора часового типа для контроля координаты заделки датчиков с точностью до 0,01 мм.

Схема образца исследуемого материала с заделанными термодатчиками и датчиком плотности теплового потока представлена на рис. 5.

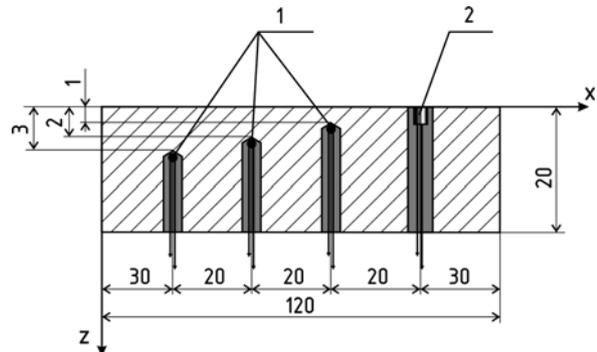


Рис. 5. Схема образца исследуемого материала с заделанными датчиками: 1 – термодатчики; 2 – датчик плотности теплового потока

Проведена серия экспериментов для определения теплопроводности строительных композиционных материалов с помощью высококонцентрированного плазменного потока. Испытания проводились для образцов композиционных материалов, состоящих из глины родиноновского месторождения и зольной микросферы (ЗМС). Выбрано 10 составов исходного сырья (табл. 1). Методом полусухого одноосного прессования при давлении 25 МПа изготовлено 3 образца каждого состава, температура обжига составляла 980 °С.

Таблица 1- Состав исходного сырья для производства испытываемых образцов

№	Содержание глины, %	Содержание ЗМС, %
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	40	60
8	30	70
9	20	80
10	10	90

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПОТОКА ПЛАЗМЫ

Обработка полученных данных осуществлялась при помощи специальной программы обработки и включала в себя определение плотности теплового потока, временную корреляцию, сглаживание и интерполяцию экспериментальных зависимостей [9].

Временная корреляция осуществлялась путем смещения температурных зависимостей по временной оси на величину

$$\tau_i = (i-1)u_k / \Delta l, \quad (13)$$

где  $i$  – порядковый номер датчика;  $u_k$  – скорость движения каретки;  $\Delta l$  – расстояние между датчиками вдоль образца.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры определялась в результате решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности (КОЗТ) на основе двумерного уравнения Фурье – Кирхгофа (11) при следующих начальных:

$$\tau = 0, T = T_B, 0 \leq x \leq l, 0 \leq z \leq h \quad (14)$$

и граничных условиях:

$$\begin{aligned} \tau > 0, x = 0, x = l \quad \frac{dT}{dx} = 0; \\ 1) \tau_\Delta > \tau > 0, z = 0, z = h \quad \frac{dT}{dz} = 0; \\ 2) \tau > 0, \tau = \tau_\Delta, z = 0 \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dz} = q(\tau), \quad (15) \\ z = h \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dz} = \alpha(T - T_B); \\ 3) \tau > 0, \tau > \tau_\Delta, z = 0 \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dz} = \alpha(T - T_B), \\ z = h \quad -\lambda(T) \frac{dT}{dz} = \alpha(T - T_B), \end{aligned}$$

где  $\tau_\Delta$  – время теплового воздействия;  $T_B$  – начальная температура (температура окружающей среды);  $x$  и  $z$  – продольная и высотная координата соответственно;  $l$  и  $h$  – длина и высота образца исследуемого материала соответственно;  $\lambda(T)$  – теплопроводность материала в зависимости от температуры;  $q(\tau)$  – плотность теплового потока, распределенная по поперечному сечению плазменной струи;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи вертикальной пластины в условиях свободной конвекции.

Для всех образцов строительных материалов на основе зольных микросфер из выбранных составов исходного сырья определен коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 20-100 °С. Теплопроводность определена при помощи вышеизложенного метода. Применение такого метода позволило оперативно выполнить оценку как влияния температуры на теплопроводность

золокерамических материалов, так и произвести анализ влияния состава исходного сырья на теплопроводность образцов.

Выяснилось, что с повышением содержания в составе исходного сырья зольной микросферы постепенно утрачивается влияние температуры на теплопроводность изделий. Это связано с изменением структуры материала, а, следовательно, с изменением механизма передачи тепла, очевидно, с увеличением закрытой пористости начинает преобладать радиационная составляющая.

Влияние состава сырья на теплопроводность золокерамических строительных материалов в диапазоне температур 20 – 100 °С (рис. 6) аппроксимировалось зависимостью

$$\lambda = 0,16 + 0,83 \cdot e^{-0,06 \cdot \text{ЗМС}}, \quad (16)$$

где ЗМС – содержание зольной микросферы.

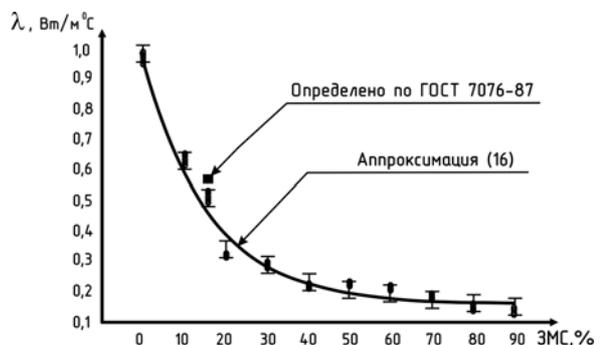


Рис. 6. Влияние состава сырья на теплопроводность золокерамических строительных материалов

Из графика видно, что теплопроводность изделия из 100% зольной микросферы (ЗМС) составит 0,16 Вт/м<sup>0</sup>С, а введение в состав исходного сырья 15 – 20 % ЗМС ведет более чем к двукратному снижению теплопроводности изделий.

Кроме того, теплопроводность теплоизоляционного материала с содержанием зольной микросферы 15% определялась методом неограниченного теплового слоя (ГОСТ 7076-87), для температуры  $T = 25$  °С теплопроводность составила  $\lambda_{ГОСТ} = 0,57$  Вт/(м<sup>0</sup>С).

Расхождение составило

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda_{ГОСТ} - k_1(1 + k_2 T)}{\lambda_{ГОСТ}} = \\ &= \frac{0,57 - (0,16 + 0,83 \cdot e^{-0,06 \cdot 15\%})}{0,57} \cdot 100\% = 12,5\% \end{aligned}$$

Выполнено исследование зависимости теплопроводности от температуры шамотного огнеупора ШБ-44, для проекторочного расчета теплоизоляции сушильных установок

завода древесностружечных плит. Температура эксплуатации строительных изделий в таких условиях достигает 200<sup>0</sup>С, а теплопроводность в диапазоне температур 20-200<sup>0</sup>С можно описать зависимостью

$$\lambda = 0,2946 + 0,0092T .$$

В настоящей работе разработан и реализован экспресс метод определения теплопроводности строительных композиционных материалов с помощью высококонцентрированного потока плазмы на основе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности. Найдены оптимальные технологические режимы проведения экспериментов для определения теплопроводности строительных композиционных материалов. Определены коэффициенты линейной зависимости теплопроводности от температуры золокерамических материалов и шамотного огнеупора ШБ-44. Установлено влияние состава композиционных строительных материалов на основе зольных микросфер на их теплопроводность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 7076-87 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности. Государственный стандарт союза ССР.М: Изд-во стандартов, 1992. – 10 с.
2. Бойков А.Г., Бойков Г.П. Определение теплопроводности строительных материалов методом упорядоченного теплового режима. Волгоград, 2000. – С. 3, 40, 17.
3. А. с. 1635099 СССР МПК<sup>7</sup> G01N25/18, Способ комплексного определения теплофизических характеристик материалов / В.В. Платонов, В.Г. Мишутин (СССР).-№4696301/25; заяв. 20.04.89; опубл. 15.03.91. Бюл. №10. – 3 с.
4. А. с. 1636752 СССР МПК<sup>7</sup> G01N25/18 Способ определения теплофизических характеристик материалов / К.О. Карамян, М.К. Даниелян, Г.А. Арзуманян, Т.А. Каргаманян, М.Э. Бабаян, А.К. Карамян (АрмССР). - №4495352/25; заяв. 18.10.88; опубл. 23.03.91. Бюл. №11. - 3 с.
5. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979.- 216 с.
6. Ошибки измерений физических величин. Зайдель А. Н. Л.: Наука. 1974. - 108 с.
7. Гольдфарб В. М., Донской А. В., Дресвин С.В., Клубникин В. С. Физика и техника низкотемпературной плазмы. – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.
8. Дресвин С. В., Михальков С. М. «Теплообмен сферических моделей и мелких движущихся частиц в плазменных струях» // Теплофизика высоких температур, 1992. Т. 30, №1.- С. 25 – 35.
9. Шильяев А.М., Волокитин Г.Г., Лысак И.А. Моделирование теплового состояния полубесконечной пластины при воздействии плазменного потока // Доклады Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. Т. 8. Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования. Сб. науч. трудов. - Томск.: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2003. – С. 122 – 126.