

УДК 536.24

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ТЕПЛОЭРОЗИОННОМ РАЗРУШЕНИИ МАТЕРИАЛА

В. Е. Абалтусов, С. Г. Гага, И. К. Жарова, Л. В. Зотова,  
Г. В. Кузнецов, Е. В. Световец

Томский государственный университет, 634050 Томск

Впервые с использованием оригинальной методики исследован тепломассообмен при взаимодействии высокотемпературной гетерогенной струи с поверхностью конструктивных материалов при большой концентрации частиц в струе. Характеристики тепломассообмена получены в условиях интенсивного разрушения материалов под действием гетерогенной струи, ось которой перпендикулярна поверхности нагрева. По результатам экспериментальных исследований выделен ряд признаков высокотемпературного разрушения стали и цементного раствора под действием гетерогенной струи.

Эффект интенсивного локального разрушения материалов под действием высокотемпературной гетерогенной струи может быть использован в технологических процессах, связанных с резкой металлических и неметаллических конструкций, при проведении подводно-технических и ремонтно-спасательных работ, утилизации военной техники и т. д. [1]. Разработка конкретных технологий и устройств на основе этого эффекта возможна при наличии теоретических моделей или экспериментальных данных об основных закономерностях исследуемого процесса в интервале параметров, соответствующем диапазону практического применения процесса теплоэрозионного разрушения. В настоящее время такие модели и экспериментальные данные отсутствуют.

Для исследования теплообмена на поверхности тел, обтекаемых высокотемпературным газовым потоком, широко применяют теплоизолированные калориметрические датчики теплового потока, основным элементом которых является калориметр с прикрепленной к нему термопарой [2, 3]. Однако при взаимодействии высокотемпературного газа с различными материалами возможен унос массы с поверхности в результате интенсивных физико-химических превращений. В этом случае целесообразно использовать методики определения теплового потока, основанные на измерении температуры внутри образца, скорости уноса массы с поверхности и решении обратных задач тепломассообмена [3–5].

При взаимодействии высокотемпературных сверхзвуковых струй с большим содержанием конденсированной фазы с поверхностью реализуются высокие скорости разрушения материала преграды (до 40 мм/с) [5]. В этом случае исследования в основном ведут с использованием расчетно-экспериментальных методик, основанных на решении обратных задач тепломассообмена. Применение этих методик требует получения высокоточной исходной экспериментальной информации о распределении температуры по глубине материала  $T(x, t)$  и скорости разрушения  $V(t)$ , что не всегда возможно.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований, позволяющие определить температуру и плотность теплового потока на нагреваемой поверхности преграды при локальном теплоэрозионном разрушении материала.

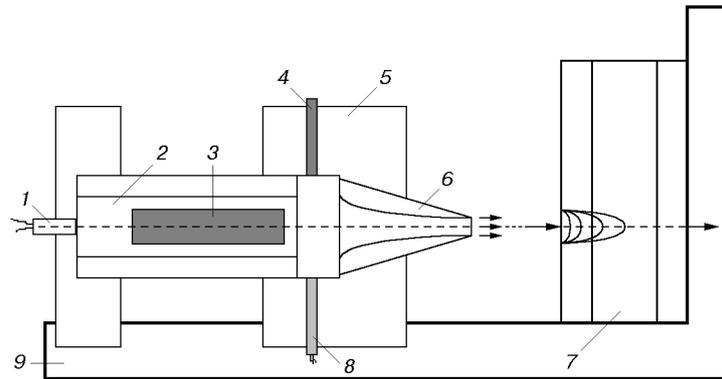


Рис. 1. Схема стенда:

1 — датчик давления; 2 — камера сгорания; 3 — заряд твердого топлива; 4 — вывод клапана сброса избыточного давления; 5 — сопловой блок; 6 — сопло; 7 — преграда; 8 — вывод электрокапсульного воспламенителя; 9 — станина

Для проведения экспериментов использовались генераторы гетерогенных струй на твердом топливе [6]. Отличительной особенностью твердотопливного генератора является возможность варьирования состава и концентрации частиц, вводимых непосредственно в топливо, и получения больших значений плотности теплового потока.

На рис. 1 представлена схема стенда. Высокотемпературная сверхзвуковая гетерогенная струя образуется при сгорании заряда смесового металлизированного топлива, размещенного в камере сгорания генератора [6]. Генератор снабжен сопловым блоком, датчиком давления и клапаном сброса избыточного давления, выполненным в виде разрывной мембраны. Для запуска генератора использовался электрокапсульный воспламенитель. Рабочее давление в камере  $P = (50 \div 200) \cdot 10^5$  Па достигалось за счет варьирования геометрических характеристик заряда и диаметра критического сечения сопла и рассчитывалось с использованием формулы Бори [7].

Использовались медные сопла с диаметром критического сечения  $3,0 \div 3,2$  мм. Заряд выполнялся в виде цилиндра длиной от 40 до 110 мм и диаметром 36 мм, заостренного с одной стороны в виде конуса. Для обеспечения равномерного горения боковая поверхность цилиндрической части заряда и плоский торец бронировались. Варьируя высоту конусообразной части заряда и, следовательно, площадь горения, можно было изменять давление в камере сгорания.

Преграды, подвергавшиеся воздействию высокотемпературной сверхзвуковой гетерогенной струи, выполнены в виде датчиков температуры и уноса массы [8]. Использовались два типа образцов — из однородного и разнородных материалов.

Преграда первого типа представляла собой стальной датчик, изготовленный из трех предварительно отшлифованных пластин с размещенными на задней стенке каждой из них хромель-алюмелевыми термопарами. Такая конструкция датчика позволяла максимально точно фиксировать расположение измерительной точки в материале. Термопары были снабжены термоэлектрозашитным покрытием, обеспечивающим повышенную точность измерений в области высоких температур, и размещались на расстоянии 5,8; 8,2; 16,0 мм от внешней поверхности пластины.

Преграда другого типа представляла собой датчик в виде трехслойной пластины, состоящей из двух стальных пластин толщиной 10 и 2 мм и слоя цементного раствора между ними (соотношение цемент — песок 1 : 3) толщиной 108 мм. Хромель-алюмелевые термопары располагались на расстоянии 10; 60; 118 мм от внешней поверхности.

Тепловое состояние материалов определялось по показаниям термопар, а скорость разрушения — по времени их разрыва.

В результате экспериментов установлено, что под воздействием высокотемпературной сверхзвуковой гетерогенной струи в пластинах образуется кратер, профиль которого близок к сильно вытянутой параболе. Известно [9], что для параболического распределения теплового потока справедливо соотношение

$$q/q_w = 1 - (x/x_*)^2,$$

где  $q$  — плотность теплового потока в направлении, перпендикулярном оси струи;  $q_w$  — суммарная плотность теплового потока в точке торможения;  $x, x_*$  — текущая координата и координата точки торможения соответственно. Расчеты, выполненные с использованием результатов экспериментов, показали, что  $q$  не превышает 10% значения  $q_w$ , и, таким образом, процесс распространения тепла по глубине материала преграды может быть описан одномерным уравнением теплопроводности.

Установлено [5, 10], что значение температуры на разрушающейся поверхности существенно ниже температуры плавления материала преграды, следовательно, теплофизические характеристики для широкого класса конструкционных материалов можно считать постоянными величинами.

При рассмотрении взаимодействия сверхзвуковой гетерогенной струи с преградой толщиной  $L$  для оценки величины  $q_w$  невозможно непосредственное применение калориметрического метода, так как не выполняются условия [2]

$$Fo = \frac{\alpha t_k}{L^2} \geq 0,35, \quad Bi = \frac{q_0 L}{\lambda T_{\max}} < 1, \quad (1)$$

где  $Fo, Bi$  — критерии Фурье и Био соответственно;  $\alpha = \lambda/(c\rho)$  — коэффициент температуропроводности;  $c$  — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $q_0$  — плотность внешнего теплового потока;  $L$  — начальная толщина преграды;  $T_{\max}$  — максимально допустимая температура на внешней поверхности преграды, определяемая условиями эксперимента;  $t_k$  — время взаимодействия.

Однако вследствие высокой скорости теплоэрозионного разрушения преграды величина  $L$  уменьшается и в некоторый момент времени  $t = t_*$  достигает значения  $\delta$ , при котором удовлетворяются условия (1). Таким образом, в момент времени  $t_*$  преграду можно рассматривать как калориметрический датчик толщиной  $\delta$ . Начало координат помещается в точку  $x = L - \delta$ . Тогда согласно [2] температурное поле в пластине определяется следующим образом:

$$T(x, t) = \frac{q_0 t}{C\rho\delta} + \frac{q_0 \delta}{\lambda} \left\{ \frac{3x^2 - \delta^2}{6\delta^2} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(\frac{a\pi^2 n^2 t}{\delta^2}\right) \cos \frac{\pi n x}{\delta} \right] \right\}, \quad \delta < L. \quad (2)$$

При  $n \rightarrow \infty$  второй член в выражении (2) мал по сравнению с первым (0,01). Тогда, продифференцировав выражение (2) по времени в точке  $t = t_*$ , для определения теплового потока на внешней поверхности преграды получим выражение

$$q_w = c\rho\delta \frac{dT_e(t_*)}{dt}, \quad (3)$$

где  $T_e(t_*)$  — значение температуры на задней стенке калориметрического датчика в момент  $t = t_*$ . В соответствии с [2] для определения теплового потока по формуле (3) необходимо использовать «максимально линейный» участок зависимости  $T_e(t)$ .

Введем величину  $\delta_{opt}$  — оптимальную толщину преграды, при которой зависимость  $T_e(t)$  является «максимально линейной» функцией ( $\delta_{opt} \leq \delta$ ) [2]:

$$\delta_{opt} = \frac{\lambda T_{\max}}{1,366 q_0}. \quad (4)$$

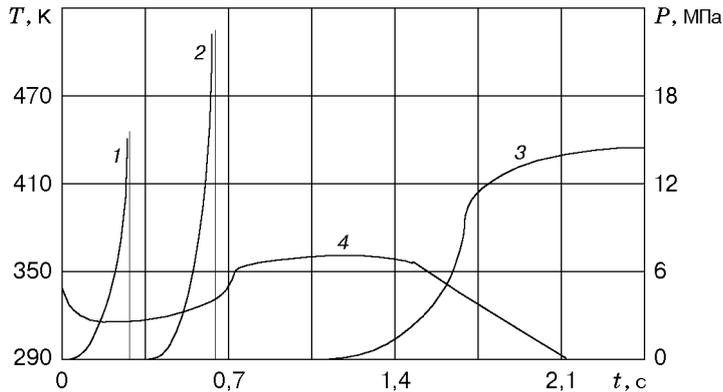


Рис. 2

Рис. 2. Результаты экспериментов с трехслойной металлической преградой:

1–3 — температура на глубине 5,8; 14,0; 30,0 мм соответственно; 4 — давление

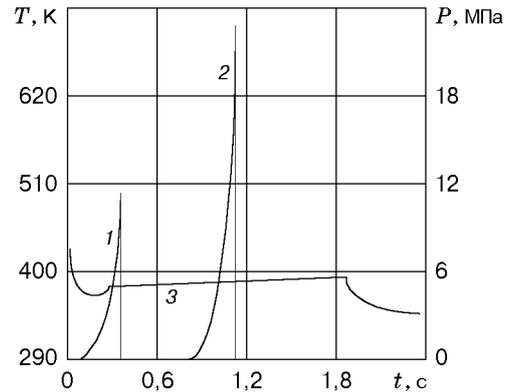


Рис. 3

Рис. 3. Результаты экспериментов с комбинированной преградой:

1, 2 — температура на глубине 10, 60 мм соответственно; 3 — давление

Тогда функция  $T_e(t)$  с учетом (4) аппроксимируется линейной зависимостью

$$T_e(t) = At + B, \quad t \in [t_{opt}, t_k], \quad (5)$$

где  $t_{opt}$  — время, когда толщина пластины  $\delta = \delta_{opt}$  ( $t_{opt} \geq t_*$ );  $A, B$  — постоянные.

Таким образом, определив из (4)  $\delta_{opt}$  и соответствующий момент времени  $t_{opt}$ , можно воспользоваться зависимостью (5) для определения плотности теплового потока согласно (3). Значения  $t_*$  и  $\delta$ , удовлетворяющие условиям (1), определялись численно методом деления отрезка на целое число частей (либо дихотомией) с учетом средней скорости теплоэрозионного разрушения, определяемой по моменту разрыва термопары, установленной на задней стенке:

$$\delta = L - Vt_*,$$

где  $V = L/t_k$  — скорость.

Осмотр датчиков после опытов показал, что вследствие теплоэрозионного разрушения в них образовывалось несквозное отверстие, профиль которого имеет форму сильно вытянутой параболы. Признаков оплавления и растрескивания датчиков не наблюдалось. Отсутствие следов оплавления на внешней поверхности стальной пластины как однородных, так и комбинированных датчиков свидетельствует о том, что на разрушающейся поверхности металлической преграды не достигается температура плавления.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов по исследованию взаимодействия сверхзвуковой высокотемпературной гетерогенной струи с трехслойной металлической преградой, а на рис. 3 — с комбинированной преградой. Средняя скорость разрушения стали составила 40 мм/с, смеси песка и цемента — 80 мм/с.

По известной средней скорости разрушения преград определялись толщина  $\delta$  и соответствующий ее достижению момент времени  $t_*$ , при которых преграду можно рассматривать как калориметрический датчик. Погрешность численного расчета составляла

Датчик	$V$ , мм/с	$t_*$ , с	$\delta$ , мм	$\delta_{opt}$ , мм	$t_{opt}$ , с	$A$ , К/с	$q \cdot 10^{-7}$ , Вт/м <sup>2</sup>
1	1,50	0,192	2,870	1,743	0,27	818,18	0,81
2	3,90	0,560	1,115	1,115	0,56	5333,30	2,10

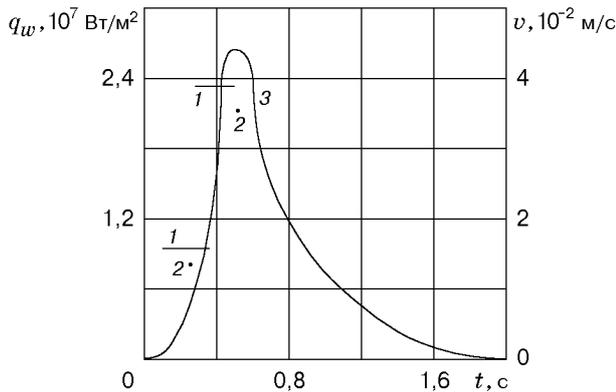


Рис. 4. Средняя скорость теплоэрозионного разрушения преграды (1) и плотность теплового потока (2), определенные по разработанной методике, и плотность теплового потока, полученная решением обратной задачи теплообмена (3)

порядка 0,001 %. По формуле (4) для каждого датчика определялась оптимальная толщина  $\delta_{opt}$ , при которой зависимость температуры от времени является «максимально линейной» функцией, а из соотношения (5) — аппроксимационные коэффициенты. Затем из соотношения (3) находилась плотность теплового потока в момент  $t_*$ . Результаты проведенных расчетов для случая взаимодействия сверхзвуковой гетерогенной струи и металлической трехслойной преграды представлены в таблице.

На рис. 4 точкам 2 соответствуют значения плотности теплового потока, полученные разработанным методом. Сравнение этих результатов и результатов решения обратной задачи тепломассообмена [10] показало, что в момент времени  $t_* = 0,192$  с значения плотности теплового потока отличаются примерно на 11 % (первый датчик), а в момент времени  $t_* = 0,56$  с отличие составляет около 22 % (второй датчик). Различие результатов, полученных двумя методами, обусловлено в первую очередь тем, что в [10] не учитывалось изменение средней скорости разрушения преграды гетерогенной струей.

Опыты, проведенные с трехслойными преградами, состоящими из разнородных материалов, показали, что при изменении давления в диапазоне  $P = (50 \div 150) \cdot 10^5$  Па скорость распространения тепла по глубине стальной пластины не превышает скорости ее разрушения, что согласуется с данными работы [10]. Об этом свидетельствуют показания термопар, расположенных на задней стенке внешней пластины. При  $P > 150 \cdot 10^5$  Па термопара разрушается прежде, чем фиксирует прогрев стальной пластины. Следовательно, при  $P > 150 \cdot 10^5$  Па скорость фронта механического разрушения превышает скорость распространения тепла по глубине.

Таким образом, представленная методика экспериментального исследования позволяет определить основные характеристики тепломассообмена (температуру и скорость разрушения, тепловой поток на разрушающейся поверхности) высокотемпературных гетерогенных струй с поверхностью конструкционных материалов при большой концентрации частиц в струе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Михатулин Д. С. Эрозия поверхностей в гетерогенных потоках. М., 1989. (Препр. / Ин-т высоких температур АН СССР; № 2-277).
2. Кирхгоф Г. Р. Калориметрический зонд для измерений теплового потока, имеющий максимальный интервал линейной зависимости время — температура // Ракет. техника и космонавтика. 1964. № 5. С. 233, 234.
3. Алифанов О. М., Репин И. В. Исследование теплообмена в гетерогенных потоках методом обратных задач теплопроводности // Теплофизика высоких температур. 1993. Т. 31, № 1. С. 78–82.

4. **Алифанов О. М., Артюхин Е. А., Ненарокомов А. В., Репин И. В.** Определение характеристик теплового взаимодействия материалов с двухфазными потоками методами обратных задач теплопроводности // Теплофизика высоких температур. 1993. Т. 31, № 3. С. 450–458.
5. **Абалтусов В. Е., Гага С. Г., Жарова И. К., Пинкин В. Ф.** Исследование тепло-массообмена при теплоэрозионном воздействии высокотемпературной гетерогенной струи на преграду // Идентификация динамических систем и обратные задачи: Тр. II Междунар. конф., Санкт-Петербург, 22–25 авг. 1994 г. СПб.: Ин-т точной механики и оптики, 1994. Т. 2. С. 11–18.
6. **Абалтусов В. Е., Алексеенко Н. Н., Немова Т. Н., Шандаков В. А.** Экспериментальное исследование теплоэрозионного разрушения материалов при взаимодействии с высокотемпературными гетерогенными потоками // Тр. I Всерос. нац. конф. по теплообмену, Москва, 10–14 нояб. 1994 г. М.: Моск. энергет. ин-т, 1994. Т. 7. С. 13–18.
7. **Соркин Р. Е.** Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе. М.: Наука, 1983.
8. **Абалтусов В. Е., Жарова И. К.** Определение тепловых граничных условий по данным температурных измерений // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1987. Т. 2, № 7. С. 33–38.
9. **Боровой В. Я.** Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем. М.: Машиностроение, 1983.
10. **Абалтусов В. Е., Гага С. Г., Жарова И. К. и др.** Определение характеристик тепло-массообмена на поверхности преграды, разрушающейся под воздействием сверхзвуковой гетерогенной струи // Тепло-массообмен: Тез. докл. III Междунар. форума, Минск, 20–24 мая 1996 г. Минск: Ин-т тепло- и массообмена, 1996. Т. 1, ч. 2. С. 227–231.

*Поступила в редакцию 29/XII 1998 г.,  
в окончательном варианте — 11/V 1999 г.*

---