

УДК 541.126:537.324

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ УДАРНО-СЖАТЫХ И РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД НА КОНТАКТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ.

Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В., Пинаев А. В.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, СО РАН, Новосибирск

Работа поддержана грантом РФФИ № 13-03-00791 и программой Президиума РАН № 2.8, 2012-2014.

АННОТАЦИЯ

В работе представлен экспериментальный метод исследования тепловых потоков на стенки канала при горении или детонации в нем газовой смеси термомпарными датчиками. Подробно рассматриваются тепловые и электромагнитные процессы, происходящие в планарных термомпарах при их импульсном нагреве продуктами реакции газовых смесей. Приводятся экспериментальные данные, полученные с помощью таких термомпар, при детонации смеси $2\text{O}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4$ в металлической трубе диаметром 70 мм, при исходных давлениях – 0,2; 0,4 атм., а также при распространении быстрого горения в трубе диаметром 1800

мм, в метано-воздушной смеси при атмосферном давлении с объемной концентрацией метана 9,3 – 9,8 %. Выполнены численные расчеты тепловых потоков из реагирующей газовой смеси на стенки канала. Термомбатареи, состоящие из таких планарных термомпар, могут быть применены в шахтах, опасных по газу, и пыли в качестве датчиков возгорания и взрыва. Характерное время формирования термомбатареи электрического импульса составляет ~ 1 мс, что позволяет использовать его в качестве стартового сигнала для запуска систем взрывопожаро-тушения, имеющих время срабатывания ~ 100 мс.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие меры по предотвращению несанкционированного динамического развития взрыва в угольных шахтах, такие как сланцевые и водяные заслоны, автоматические системы взрывоподавления - локализации взрывов и др. вследствие низкой скорости срабатывания имеют недостаточную эффективность. Их запоздалое реагирование не позволяет своевременно провести инертизацию или ингибирование атмосферы необходимого объема горной выработки. Одной из причин такого запаздывания является низкая надежность или значительная инерционность датчиков этого явления для передачи оперативной информации о произошедшем явлении с це-

лью своевременного управления процессом формирования взрывоподавляющего заслона. Здесь рассматривается возможность применения термомбатареи планарных термомпар в качестве малоинерционных датчиков возгорания и взрыва.

Процессы горения и детонации газовых смесей в каналах сопровождаются значительным подъемом температуры и, как следствие, интенсивным теплообменом горячих продуктов реакции с контактирующими с ними стенками. Ниже описывается метод измерения тепловых потоков в таких условиях с помощью термомпар, работа которых основана на использовании эффекта Зеебека [1, 2].

ТЕОРИЯ

Для понимания сути предлагаемого метода рассмотрим конструкцию элемента планарной термомбатареи, схематически изображенной на рис.1. Элемент термомбатареи представляет со-

бой константановую ленту – 2, частично покрытую электролитическим способом слоем меди – 3, размещенную на поверхности теплоизолирующей подложки – 1. На эту ленту,

состоящую из чередующихся монометаллических (константановых) и биметаллических (медь-константановых) частей, нанесен защитный слой – 4 так, чтобы каждый второй стык монометалла с биметаллом был изолирован от контакта с горячим газом. Толщины константановой ленты – 5 мкм, слоя меди – 2.75 мкм, защитного слоя – 50 мкм, подложки – 1 мм, ширина ленты – 350 мкм. Часть ленты, состоящая из одной монометаллической и биметаллической частей, представляет собой одну термопару. Длины монометаллической и биметаллической частей, а также участков термопары, покрытых защитным слоем, были одинаковыми и равными 500 мкм. На открытую часть термопары, в результате ее теплообмена с контактирующим горячим газом, идет поток тепла, в то время как защищенная часть термопары остается теплоизолированной от воздействия окружающей среды. Это приводит к неоднородному нагреву термопары и появлению на ней напряжения [2], зависимость которого от времени регистрируется цифровым осциллографом.

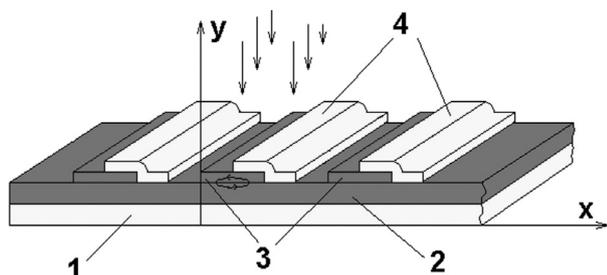


Рис.1 Элемент термобатареи.

Рассмотрим задачу, об определении плотности теплового потока $q_0(t)$ по измеренной зависимости напряжения на термопаре от времени - $V(t)$. Итак, пусть в момент времени τ количество тепла, полученного незащищенной частью термопары за время $d\tau$, равно $dQ_0(\tau) = q_0(\tau)d\tau$. Решая, прямую задачу для такого мгновенного импульса тепла, найдем при $t \geq \tau$ зависимость напряжения на термопаре от времени, обусловленную этим импульсом: $dV(t-\tau) = G(t-\tau)q_0(\tau)d\tau$, где $G(t-\tau)$ - напряжение на термопаре при мгновенном единичном импульсе тепла. Тогда, в случае малых изменений величин теплофизических и термоэлектрических коэффициентов, изменения напряжения от получаемых термопарой порций тепла аддитивно складываются, и в момент времени t :

$$V(t) = \int_0^t q_0(\tau)G(t-\tau)d\tau = Q_0(t) \frac{dG(t)}{dt} \Big|_{t=0} - \int_0^t Q_0(\tau) \frac{dG(t-\tau)}{dt} dt \quad (1)$$

Это интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода, корректное при определении $Q_0(t)$, ядро которого $\frac{dG(t)}{dt}$ находится численным расчетом с произвольной точностью (рис.2).

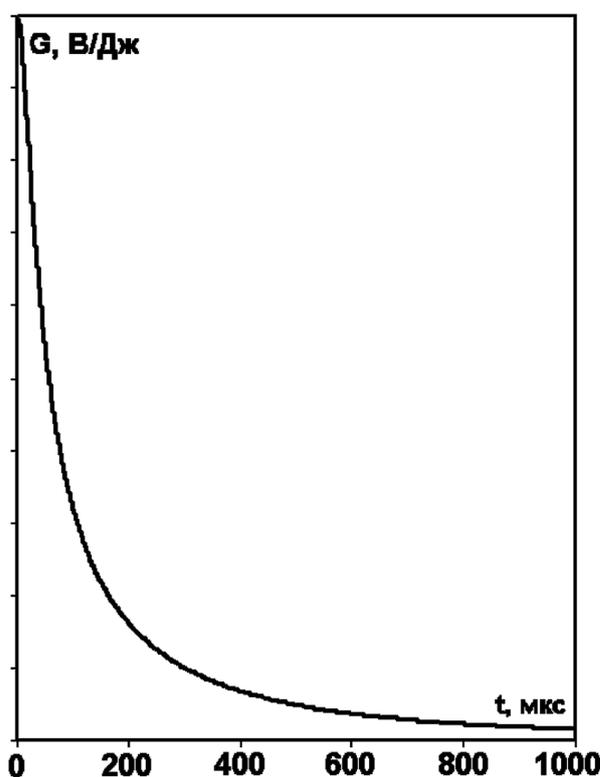


Рис.2 Ядро интегрального оператора.

Функция $Q_0(t)$, при экспериментально определенной $V(t)$, вычислялась путем алгебраизации уравнения (1). Для расчета зависимости $q_0(t)$ необходимо выполнение некорректной процедуры - дифференцирования функции $Q_0(t)$ по времени. Это возможно без существенной потери точности, при наличии априорной информации о гладкости искомого решения. Ниже, при рассмотрении результатов экспериментов, будет обсуждаться такая априорная информация относительно характера поведения $q_0(t)$.

Таким образом по измеренной зависимости напряжения на термопаре от времени рассчитывается величина теплового потока от горячего газа к стенкам канала.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Учитывая значительный диапазон изменения скоростей распространения волн горения и детонации, а также принципиальное их различие по структуре фронта и величинам газодинамических параметров течения [3], тестирование термобатарей проводилось как для детонационного режима, так и для режима горения. В лабораторных экспериментах с детонационным режимом использовалась металлическая труба длиной 7 м и диаметром 70 мм, в которую для измерения тепловых потоков от продуктов детонации помещалась термобатарея площадью 1,25 см², содержащая 250 термопар. Эксперименты с детонацией были проведены на смеси CH₄+2O₂+N₂ при исходных давлениях – 0,2; 0,4 атм, инициирование производилось с помощью электрического разряда. Измеренная пьезоэлектрическими датчиками скорость детонации оказалась равна 2220 м/с, что соответствует ее теоретическому значению [3]. Выбор данной смеси и размеров детонационной трубы определялся условием сохранения геометрического подобия детонационных явлений в метано-воздушных смесях в условиях реальной шахты и в метановых смесях в лабораторных условиях. Параметром геометрического подобия служит отношение между характерным размером канала - диаметром трубы или шахтного штрека - и характерным размером зоны химической реакции в детонационной волне – размером детонационной ячейки.

На рис. 3а приведены осциллограммы зависимостей $V(t)$ для начальных давлений смеси 0,2 атм и 0,4 атм. Здесь же, на рис. 3б изображены, рассчитанные с помощью уравнения (1) зависимости $q_0(t) = Q_0(t)$. Зависимости $Q_0(t)$, как видно из сравнения, хорошо аппроксимируются функциями вида $Q_*(t) = Q_0(1 - e^{-\alpha t})$ с показателем экспоненты $\alpha = 0.48 \text{ мс}^{-1}$. Вид функциональной зависимости $Q_*(t)$ выбирался из следующих соображений. Горячий газ с удельной тепловой энергией пропорциональной температуре $E(T) \propto T$, двигаясь вдоль металлической трубы, непрерывно остывает в процессе теплообмена со стенками, с плотностью теплового потока $q_*(t) \propto (T - T_0)$.

Тогда

$$\frac{dE}{dt} \propto \frac{dT}{dt} \propto (T_0 - T),$$

откуда следует, что $q_*(t) = q_0 e^{-\alpha t}$,
 $Q_*(t) = Q_0(1 - e^{-\alpha t})$, $q_0 = \alpha Q_0$.

Значения q_0 и α были найдены из условия минимума $\sum_{i=1}^n [V_*(t_i) - V(t_i)]^2$, где $V_*(t_i)$ и $V(t_i)$ - рассчитанные и экспериментально определенные величины напряжения на термопаре в момент времени t_i , соответственно. Экспериментально определенные величины тепловых потоков на стенку детонационной трубы оказались равными $\sim 1 \text{ кВт/см}^2$, при давлении газовой смеси 0,2 атм и $\sim 2 \text{ кВт/см}^2$, при давлении 0,4 атм (рис. 2, 3).

Следующая серия крупномасштабных экспериментов, приближенных к шахтным условиям, проводилась в металлической трубе диаметром 1,8 м, длиной 15м, частично заполненной метано-воздушной смесью, с объемным содержанием метана 9,3 – 9,8 %, инициировался процесс взрывом 100 граммового заряда детонита.

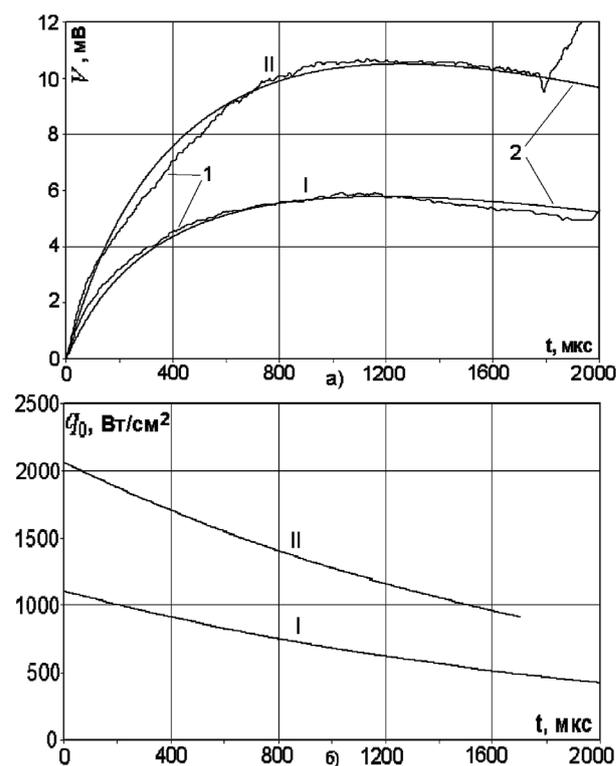


Рис.3 Результаты экспериментов и расчетов при начальных давлениях газовой смеси 0.2 атм (I) и 0.4 атм (II). а) экспериментальные (1) и рассчитанные (2) зависимости напряжения на термопаре от времени, б) – зависимости плотности теплового потока от времени.

На рис.4а. приводятся осциллограммы зависимости измеренных напряжений от времени на термопарах в трех одинаковых экспериментах (кривые 1, 2, 3). Для каждого из экспериментов рассчитывалась зависимость $Q_0(t)$, показанная на рис. 4б.

Для всех вышеописанных экспериментов выполнены численные расчеты тепловых потоков из реагирующей газовой смеси на стенки канала. Скорость распространения процесса в метано-воздушной смеси составляла 480 м/с, причем головная часть представляет собой ударно-сжатую метано-воздушную смесь, а за ней с отставанием 5 – 7 мс движется фронт горения этой смеси. Тепловые потоки в головной части и в зоне горения смеси отличаются в ~ 5 - 8 раз. Такой процесс является существенно неоднородным и нестационарным и в этом случае имеет смысл указать лишь средние значения плотности теплового потока в областях сжатой смеси и за фронтом горения. Для головной части она составляет ~ 40 Вт/см², для области горения смеси ~ 300 Вт/см².

ВЫВОДЫ

Эксперименты показали, что термобатареи из термопар вышеописанного типа позволяют однозначно определить характер, распространяющегося в канале процесса, так как плотность потоков тепла в ударно-сжатой смеси почти на порядок ниже, чем в следующей за ней волне быстрого горения. При этом плотность потока в зоне быстрого горения в свою очередь на порядок меньше, чем за фронтом детонационной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. Физматлит, 1995. 656 с. Landau L.D., Lifshitz E.M. Electrodynamics of solid states. Fizmatlit, 1995. 656 p.
2. Г.Е. Кузьмин, В.В. Пай, И.В. Яковлев. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. Новосибирск, Изд. СО РАН, 2002 г. 312 с. G.E. Kuzmin, V.V. Pai, I.V. Yakovlev. Experimental-analytic methods in tasks of

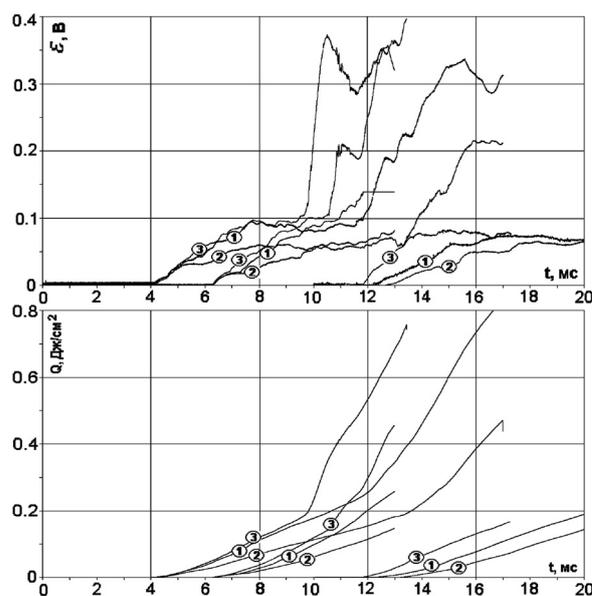


Рис.4 а) зависимости напряжения на термобатареях от времени; 1,2,3 – номера экспериментов. б) зависимости количества тепла от времени.

Представляя собой источники - преобразователи энергии постоянной готовности, такие термобатареи могут быть применены в качестве датчиков регистрации возгорания и детонации в шахтах опасных по газу и пыли. Характерное время формирования термобатареи электрического импульса составляет ~ 1 мс, что позволяет использовать его в качестве стартового сигнала для запуска систем пожаротушения, имеющих время срабатывания ~ 100 мс.

- dynamic loading of materials. Novosibirsk. Publ. SB RAS, 2002, 312 p.
3. A.A.Vasil'ev, A.A.Trubitsyn, A.V.Pinaev, a.o. Characteristics of combustion and detonation of methane-coal mixtures//9-th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Krakow, Poland, July 22-27, 2012. 9th ISHPMIE Proceedings (USB, ish063.pdf, 9 pages.