УДК 536.087.92

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ В УДАРНЫХ ТРУБАХ: МЕТОДИКА И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сапожников С.З.[1], Митяков В.Ю.[1], Митяков А.В.[2], Бобашев С.В.[3], Менде Н.П.[3], Сахаров В.А.[3]

[1]*Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2]*Лаппеенрантский технологический университет, Лаппеенранта, Финляндия*
[3]*Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №№ 10-08-01138-а)

АННОТАЦИЯ

Предложено использовать градиентные датчики теплового потока (ГДТП) для теплометрии на внутренних поверхностях ударной трубы (УТ) и на поверхностях тел, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа и плазмы. Показано, что результаты опытов ведут к новым трактовкам физических процессов в УТ и коррелируют с результатами других методов диагностики течений. Уникальное быстродействие ГДТП и их работоспособность в электромагнитных полях делают их перспективным средством изучения процессов в УТ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ РЕЖИМОВ ОБТЕКАНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Тепловые процессы в ударных трубах существенно нестационарны: характерное время имеет порядок 10^{-3} с и менее, а теплообмен в системе «газ – стенка» сложен по физической природе и изучен недостаточно. В то же время результаты экспериментов на ударных трубах важны и необходимы, в частности, при проектировании сверх- и гиперзвуковой транспортной техники.

В таких экспериментах традиционно измеряют давление в полости УТ и температуру на ее стенках (цилиндрической и торцевой) [1]. Измерения тепловых потоков на этих поверхностях теплообмена, насколько нам известно, до последнего времени не проводились: причина, как и во многих других случаях, отсутствие датчиков теплового потока с приемлемой постоянной времени (10^{-5} с и менее). В то же время данные о тепловых потоках и факторах, на них влияющих, вызывают интерес исследователей. За неимением экспериментальных данных тепловой поток определяют расчетным путем [2]; в случаях, когда теплообмен происходит в электрических и магнитных полях, тепловые потоки вообще не имеют расчетной оценки.

Малоинерционные пленочные термопары и термометры, успешно применяемые для измерений в УТ, обладают ограниченной термостойкостью (обычно не выше 200°С) [3]. Это не препятствует термометрии даже в случаях, когда температура газа достигает (7…8)·103 К – ввиду кратковременности опыта. Оценки, выполненные с использованием теории теплопроводности [4, 5 и др.], показывают, что температура внутренней поверхности стенки УТ повышается за время опыта всего на 100…200 К, поэтому ГДТП на основе висмута вполне пригодны для работы в таких условиях.

В связи с изложенным становится актуальным эксперимент с использованием принципиально иных датчиков теплового потока, названных в работах [6, 7] градиентными. Действие градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) основано на поперечном эффекте Зеебека: в среде с анизотропией теплопроводности, электропроводности и коэффициентов термоЭДС при прохождении теплового потока возникает электрическое поле, вектор напряженности которого E нормален вектору теплового пока q (рис.1, а).

Экспериментально установлено [6], что постоянная времени ГДТП имеет порядок

10^{-8}…10^{-9} с, что делает их сопоставимыми с лучшими современными датчиками ALTP [8] при значительно больших чувствительности, разнообразии конструкций и вариантах размещения на исследуемых объектах.

Одним из лучших является ГДТП, выполненные на основе анизотропного монокристаллического висмута чистоты 0,9999 (рис.1, б). Анизотропные термоэлементы 1 (названные так по предложению А.Г.Самойловича [9]) соединены последовательно спаями 3 для увеличения сигнала и разделены по боковым поверхностям лавсановыми прокладками 5. Батарея смонтирована на подложке из слюды 2 и снабжена токовыводами 4. Размеры ГДТП в плане меняются от 1x1 мм^2 до 10x10 мм^2, а их толщина составляет 0,1…0,2 мм. Вольт-ваттная чувствительность датчиков зависит от плотности укладки термоэлементов и меняется в диапазоне 5…50 мВ/Вт.

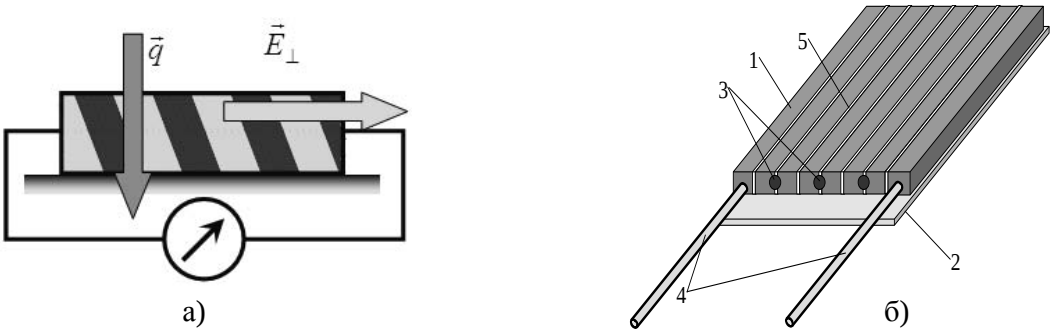

Рис.1 Градиентные датчики теплового потока: а – схема, б – батарейный датчик из анизотропного висмута. Цифрами обозначены: 1 – анизотропный термоэлемент; 2 – подложка из слюды; 3 – спаи из чистого висмута; 4 – токовыводы; 5 – лавсановые прокладки.

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ УДАРНЫХ ТРУБ

Исследования проводились на ударной трубе (УТ) лаборатории газодинамики ФТИ им.А.Ф.Иоффе РАН [1] (рис.2). Во всех опытах использовались ГДТП площадью 4×7 мм2 и толщиной 0,2 мм, наклеенные на металлическую стенку, органическое стекло или на тефлон.

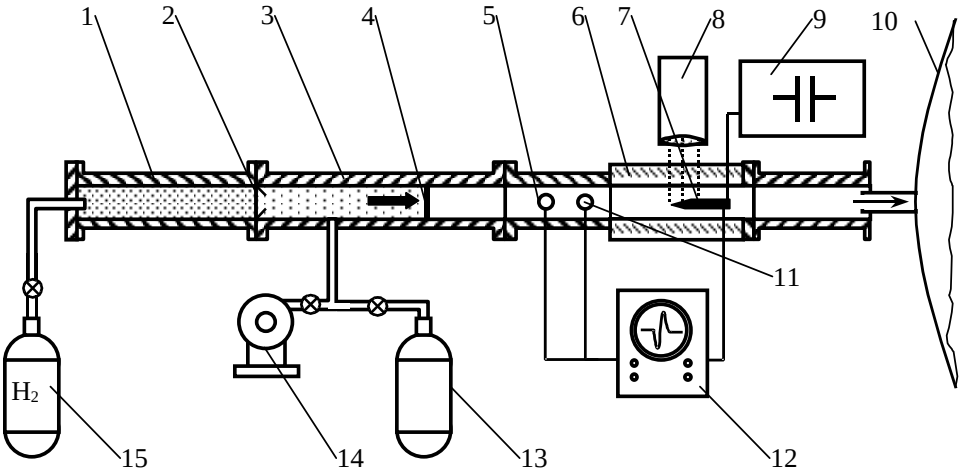

Рис.2 Схема экспериментальной установки ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН. Цифрами обозначены: 1 – камера высокого давления; 2 – диафрагма; 3 – камера низкого давления; 4 – фронт ударной волны; 5 – датчик давления; 6 – вакуумная камера; 7 – испытуемое тело; 8 – система оптических измерений; 9 – источник высокого напряжения; 10 – ресивер; 11 – вставки с ГДТП; 12 – осциллограф; 13 – баллон с газом; 14 – вакуумный насос; 15 – баллон с водородом.

Опыты проводились в атмосфере воздуха, нагреваемого ударной волной с числом Маха М = 6…7. ГДТП монтировали заподлицо с внутренней цилиндрической стенкой УТ в сечениях, отстоящих от закрытого торца на 100 и 425 мм, ориентируя датчики меньшей стороной вдоль оси УТ.

В этих же сечениях устанавливали пьезоэлектрические датчики давления с диаметром чувствительного элемента 4 мм. Таким образом, в каждом опыте регистрировали плотность теплового потока и давление вначале за падающей ударной волной, а затем за ударной волной, отраженной от закрытого торца УТ.

На рис.3 показаны результаты измерения плотности теплового потока. Начало импульсов совпадает с приходом к ГДТП падающей ударной волны.

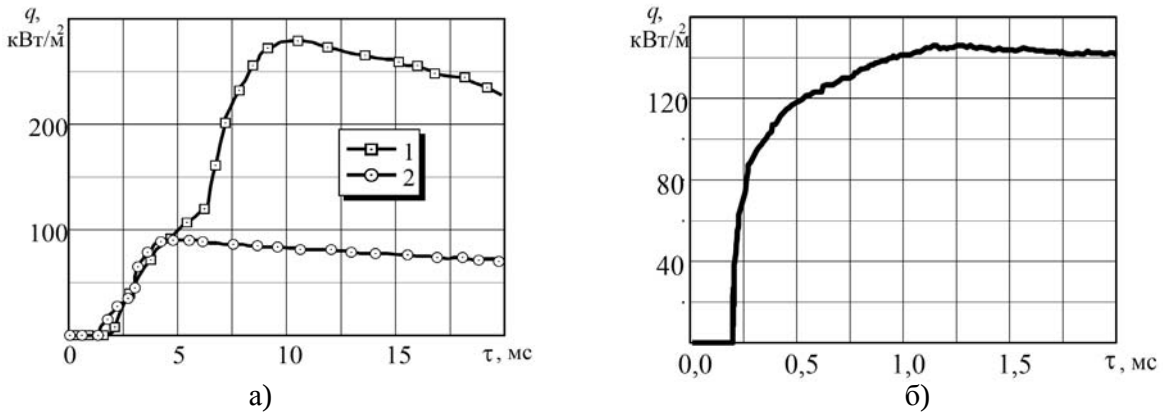

Рис.3 Данные градиентной теплометрии: а – полученные от ГДТП, установленных на удалении 98 мм (1) и 40 мм (2); б – полученные от ГДТП, установленного в торце УТ.

При размещении ГДТП на расстояниях 98 мм и 40 мм от торца УТ установлено, что амплитуда сигнала с уменьшением расстояния до торца УТ убывает (рис.3, а). ГДТП в торце трубы (рис.3, б) в момент прихода и отражения ударной волны сразу оказывается в области неподвижного газа с более высокой температурой (≈ 900 К).

Примерно через τ=1,5 мс после отражения ударной волны тепловой поток достигает практически неизменного уровня.

Он сохраняется вплоть до τ≈7 мс, когда к торцу УТ приходит контактная поверхность, которая разделяет частицы газа в камерах высокого и низкого давления. Максимальный уровень плотности теплового потока на цилиндрической стенке канала вдвое выше, чем на торце.

Это, на наш взгляд, свидетельствует о различии в механизмах теплообмена: на торце УТ теплообмен протекает так же, как между двумя полуограниченными стержнями [5], в то время как на цилиндрической стенке преобладает конвективный теплообмен.

Интересны опыты, в которых синхронно записаны изменения давления, плотности теплового потока и температуры (измеренной тонкопленочным платиновым термометром сопротивления) на торце.

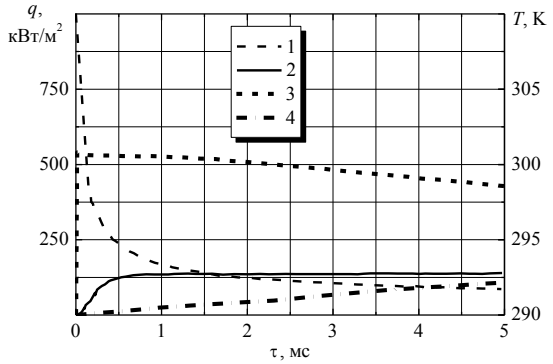

Рис. 4 Расчетные изменения температуры (кривая 3) и плотности теплового потока (кривая 1) на торце УТ в сравнении с экспериментом (кривые 2 и 4, соответственно).

Принято считать, что на торце УТ пограничный слой не формируется, а температура поверхности с приходом ударной волны меняется скачком; это, в соответствии с теорией теплопроводности [5 и др.], означает, что начальная плотность теплового потока должна быть бесконечно большой.

Фронт сигнала ДТП, близкий к вертикальному, ранее получить не удавалось; это приписывали недостаточному быстродействию датчика. Однако постоянная времени ГДТП из висмута не превышает 10^{-8} с, эти датчики обязательно зафиксировали бы «всплеск» плотности теплового потока, если бы он существовал.

Эксперимент (рис.4) показывает, что температура и плотность теплового потока меняются совершенно по-иному: плотность теплового потока почти постоянна (за исключением начального участка продолжительностью 1 мс), а температура плавно и без экстремума (в пределах 5 мс) возрастает на 1,9 К.

На наш взгляд, здесь уместна своего рода «электротепловая аналогия». В электротехнике первый закон коммутации утверждает, что напряжение на емкости скачком измениться не может. Точно так же, хотя и по гораздо более сложным физическим причинам, не может измениться скачком температура на поверхности твердого тела: в противном случае плотность теплового потока в начале процесса стала бы бесконечной, что противоречит как физическим представлениям, так и результатам экспериментов. Именно экспериментально установленный ход кривых на рис.4 следует использовать при численном моделировании процессов теплообмена в УТ – например, рассчитывая переменное во времени значение коэффициента теплоотдачи на торце УТ.

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ОБТЕКАЕМЫХ ТЕЛ

В описанных выше экспериментах ГДТП на основе монокристаллов висмута продемонстрировали свою работоспособность в импульсном высокотемпературном потоке газа. Серия специальных опытов показала, что эти датчики способны работать в условиях сильных внешних электромагнитных полей.

Следующим шагом стали опыты, позволяющие сосредоточить все элементы электромагнитной системы на исследуемом объекте, обтекаемом сверхзвуковым потоком газа или плазмы.

Схема электромагнитного устройства показана на рис.5. Исследуемая модель – тело вращения, изготовленное из диэлектрического материала – имеет форму цилиндра диаметром 26 мм и длиной 40 мм, сопряженного с конусом с углом при вершине 60°. На цилиндрической части соосно с моделью расположен соленоид 1, состоящий из 20 витков медного провода диаметром 1 мм. В месте сопряжения конуса и цилиндра заподлицо с поверхностью расположен кольцевой электрод 2, к которому подключен один из концов обмотки соленоида, а другой конец соединен с источником напряжения. В качестве источника импульсного напряжения используется линия с сосредоточенными параметрами, состоящая из 14 LC-ячеек, которая перед экспериментом заряжается до напряжения 300…700 В.

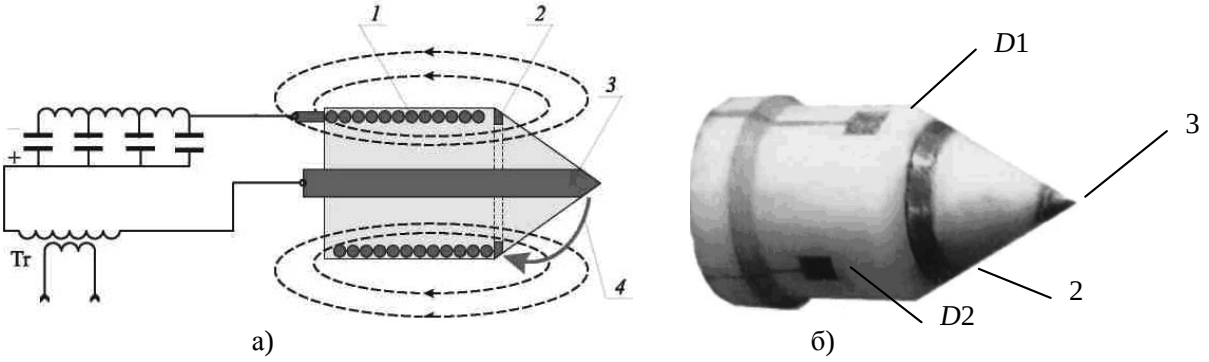

Рис.5 Электрическая схема (а) и размещение ГДТП на обтекаемом теле (б). Цыфрами обозначены: 1 – соленоид; 2 – кольцевой электрод; 3 – центральный электрод; 4 – линии тока в плазме; D1, D2 – ГДТП.

Другой полюс источника напряжения соединяется через вторичную обмотку высоковольтного трансформатора с центральным электродом 3, расположенным вдоль оси модели. Электрод 3 представляет собой стержень из латуни диаметром 6 мм с конической носовой частью.

Для запуска устройства на первичную обмотку трансформатора подается импульс напряжением 12 кВ и длительностью 1 мкс. Импульс вторичной обмотки амплитудой до 30 кВ вызывает электрический пробой в разрядном промежутке между центральным 3 и кольцевым 2 электродами. В результате по цепи, состоящей из плазменного промежутка и соленоида, в течение 1,5 мс осуществляется разряд источника и возникает импульсный ток около 100 А. Магнитное поле, возникающее при прохождении тока через соленоид, взаимодействует с током в плазме 4; в результате плазма приобретает вращательное движение вокруг тела в азимутальном направлении.

В торце канала УТ располагалась рабочая секция прямоугольного сечения со сверхзвуковым соплом. Параметры сверхзвукового потока азота в выходном сечении сопла: давление – 5 кПа, плотность – 0,04 кг/м^3, температура – 440 К, скорость – 1600 м/с число Маха – 4.

Тело вращения, описанное выше, располагалось внутри рабочей секции за выходным сечением сопла. Вид тела и ГДТП на его поверхности показаны на рис.5, б.

В экспериментах обнаружена существенная зависимость частоты вращения плазмы от полярности подключения внешнего источника. Для варианта, когда кольцевой электрод служит катодом, среднее значение частоты вращения составило 30 кГц, а в случае, когда кольцевой электрод служит анодом – 15 кГц.

В первой серии опытов (рис.6, а) плотность теплового потока измерялась в неподвижном воздухе при давлении 50 кПа для двух различных вариантов подключения внешнего источника. Напряжение источника составляло 500 В, а ток в плазме достигал 700 А. Для варианта подключения, когда кольцевой электрод является катодом (кривая 1), установившееся значение плотности теплового потока почти на порядок больше, чем при противоположной полярности.

Во второй серии опытов (рис.6, б) при обтекании тела вращения сверхзвуковым (М = 4) потоком азота для обоих вариантов подключения электродов величина тока в плазме не изменялась и оставалась той же, что и в опытах без обтекания.

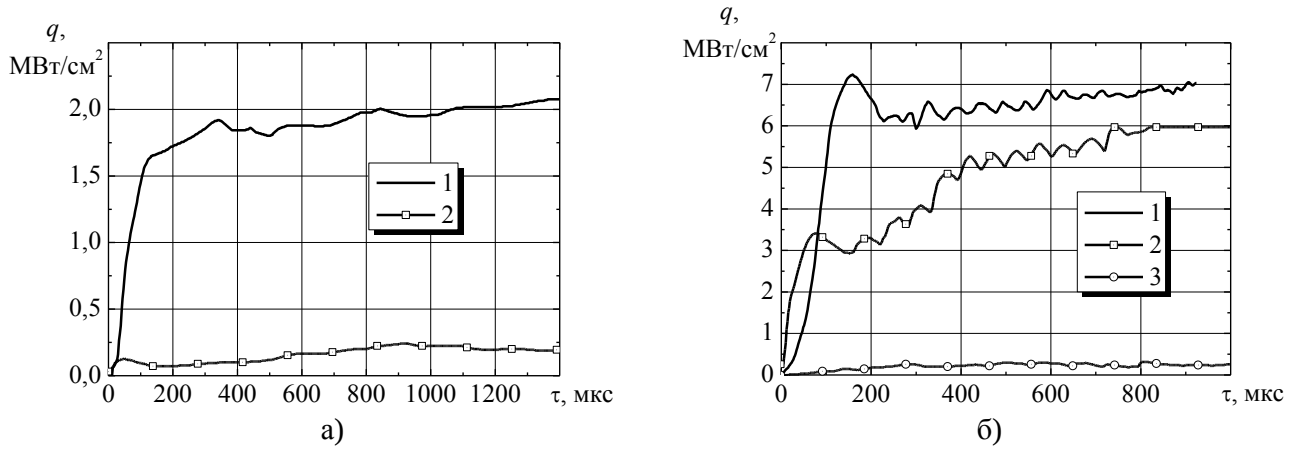

Рис.6 Изменение плотности теплового потока на поверхности модели в неподвижном воздухе (а) и при обтекании плазмой (б). Цифрами обозначены случаи: 1 – когда кольцевой электрод служит катодом, 2 – когда он служит анодом, 3 – при выключенном МГД-устройстве.

Однако, как и в опытах без обтекания, средняя величина плотности теплового потока в случае, когда кольцевой электрод служит катодом (кривая 1) заметно больше, чем при противоположной полярности (кривая 2).

Заметим, что для варианта подключения, когда кольцевой электрод служит анодом, частота пульсации 15 кГц соответствует частоте вращения плазмы, измеренной с помощью фоторегистратора. В случае, когда кольцевой электрод служит катодом, частота вращения плазмы вдвое больше. В этом случае вид сигнала ГДТП не позволяет выделить характерную частоту пульсаций. Однако спустя 300 мкс от начала

процесса средняя величина плотности теплового потока становится практически неизменной во времени, а амплитуда пульсаций – малой по отношению к среднему уровню сигнала ГДТП.

Поскольку в описанных экспериментах энергия, затраченная на возбуждение газоразрядной плазмы, соизмерима с кинетической энергией сверхзвукового потока, плотность теплового потока к поверхности тела при работе электромагнитного устройства оказывается большей, чем когда устройство не работает (рис.6, б, кривая 3).

Измерения показали, что можно добиться режима обтекания тела газоразрядной плазмой, когда плотность теплового потока на поверхности близка к стационарной. Это позволяет использовать предложенную схему для моделирования сверхзвукового обтекания тел высокотемпературным газовым потоком, изучать результаты МГД-воздействия на общую картину течения около тела и плотность теплового потока к его поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что градиентные датчики теплового потока существенно расширяют возможности и информативность теплометрии в ударных трубах. Они позволяют по-новому представить физику течения и теплообмена в сверхзвуковых потоках газа и плазмы. Данные градиентной теплометрии коррелируют с другими методами диагностики и дают ряд новых результатов, интересных как в фундаментальном, так и в прикладном смысле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников, В.Г., Сахаров, В.А. Двухдиафрагменная ударная труба Физико-технического института [Текст] / В.Г. Масленников, В.А. Сахаров // Журнал технической физики. – 1997. – Т. 67. – № 11. – С. 88□95.
2. Акатнов, Н.И. и др. Исследование на ударной трубе с соплом сверхзвуковых МГД каналов на неравновесной плазме инертного газа [Текст] / Н.И. Акатнов [и др.] // Журнал технической физики. – 1982. – Т.52. – Вып. 5. –С. 884□-892.
3. Жилин, Ю.В. Методика измерения стационарных тепловых потоков с помощью пленочных датчиков сопротивления [Текст] / Ю.В. Жилин // ИВТАН. Препринт № 2-005, 1976. – 25 с.
4. Карслоу, Г. Теплопроводность твердых тел [Текст] \ Г. Карслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 488 с.
5. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
6. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте [Текст] / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 202 с.
7. Митяков, В.Ю. Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте [Текст]: дис. … д-ра тех. наук: 01.04.14: защищена : утв. / Митяков Владимир Юрьевич; СПбГПУ. – СПб, 2005. – 239 с.
8. Knauss, H., Gaisbauer, U., Wagner, S., Buntin, D., Maslov, A., Smorodsky, B., Betz, J.A Novel sensor for fast heat flux measurements. AIAA 2006-3637. 32 p.
9. Anisotropic thermoelement, UK Patent No.1088764 / Samoilovich A.G., Korenblit. from 25.10.1964.