

На правах рукописи

МИТЯКОВ Владимир Юрьевич

ВОЗМОЖНОСТИ ГРАДИЕНТНЫХ ДАТЧИКОВ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА  
НА ОСНОВЕ ВИСМУТА В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Специальность 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург - 2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «Теоретические основы теплотехники»

Научный консультант доктор технических наук,  
профессор Сапожников Сергей Захарович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Арефьев Константин Максимович

доктор технических наук,  
профессор Зейгарник Юрий Альбертович

доктор технических наук,  
профессор Терехов Виктор Иванович

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Балтийский государственный  
технический университет» (Военмех)

Защита диссертации состоится «            »            2005 года в            ч на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29, главное здание, ауд.            .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «СПбГПУ».

Автореферат разослан «            »            2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор.

Н. Н. Кортиков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный натурный теплотехнический эксперимент составляет, наряду с экспериментом численным, основу теплотехнических исследований; он широко используется в промышленности и иных областях человеческой деятельности. Развитие теории, методологии и техники натурального эксперимента связано, в первую очередь, с успехами цифровой технологии обработки сигнала. При этом визуализацию, архивирование, учет индивидуальных градуировок, математическую обработку результатов обеспечивает именно преобразовательная техника, а датчики измеряемых величин остались в основном прежними.

Разрыв в техническом уровне между датчиками и преобразующим их сигналы цифровым трактом постоянно возрастает. В то же на пути развития цифровых технологий остаются следующие препятствия:

1. Многие параметры (коэффициент теплоотдачи, скорость движения среды, плотность теплового потока и т.д.) оценивают преимущественно расчетным путем, причем точность расчета не всегда удовлетворительна.
2. Крайне редко один датчик позволяет измерить несколько величин (скорость, температуру, тепловой поток и т. д.).
3. Число каналов связи ограничено (особенно на транспорте, в космической технике, в энергетике), поэтому важно передавать по каждому из них максимум информации.

Тепловой поток – средний или местный – измеряют значительно реже, чем температуру. Это, в первую очередь, связано с отсутствием или редкостью надежных, дешевых, а потому распространенных и привлекательных для экспериментатора датчиков теплового потока.

Предметом наших исследований стали датчики теплового потока, впервые предложенные и сконструированные для демонстрационных физических экспериментов Н.П. Дивиным. Помимо задач теплотрии, эти датчики (названные впоследствии градиентными) удалось использовать для определения температуры, расхода жидкости, касательных напряжений трения, теплофизических характеристик материалов, степени черноты поверхностей, параметров электрических цепей.

Градиентные датчики теплового потока (ГДТП) существенно превосходят по быстродействию почти все аналоги, и потому являются удобным, а иногда единственным инструментом, как в измерении нестационарных тепловых потоков, так и при определении других нестационарных параметров.

Цель и задачи работы. Предлагается сделать ГДТП и устройства на его основе многофункциональными измерительными преобразователями для широкого круга теплотехнических экспериментов. Основными задачами при этом являются:

1. Анализ возможностей ГДТП в сравнении с лучшими современными аналогами.
2. Исследование динамических характеристик ГДТП.

3. Тестирование ГДТП в рамках классических задач теплообмена и определение с их помощью частотных характеристик тепловых процессов.
4. Использование ГДТП для создания полезных моделей и приборов, а также в рамках крупномасштабных экспериментов.
5. Построение расчетных схем, создание макетов и действующих образцов аппаратуры для использования ГДТП в нетрадиционном качестве – для измерения температуры, расхода жидкости, касательных напряжений трения и т.п.

Предметом исследования являются ГДТП, выполненные на основе монокристаллического анизотропного висмута чистоты 99,99%, а также датчики, измерительные зонды и другая аппаратура, в которых ГДТП являются неотъемлемой частью. Кроме того, предметом исследования являются физические процессы, параметры которых определены (в ряде случаев впервые) с помощью ГДТП и устройств на их основе.

Методы исследования включают натуральный теплотехнический и теплофизический эксперимент с использованием ГДТП, аналитические расчеты и численное моделирование тепловых процессов. В работе использованы современные цифровые технологии обработки сигналов ГДТП, а также некоторые вспомогательные приемы из смежных областей (метрологии, теории электрических измерений, цифровой схемотехники и т.д.).

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые комплексно исследованы динамические характеристики ГДТП и впервые зарегистрированы пульсационные характеристики теплового потока в ряде экспериментов при вынужденном конвективном теплообмене вблизи изотермической поверхности, на вертикальной пластине с электрообогревом, в ударных трубах, на огневых поверхностях камеры сгорания дизельных двигателей и др. Предложены новые пути использования ГДТП для определения температуры, расхода, касательных напряжений трения, теплофизических и радиационных характеристик, а также параметров электрических цепей.

Практическая ценность работы определяется как тем, что ГДТП позволяют существенно расширить возможности нестационарной теплотехники, так и тем, что использование ГДТП и аппаратуры на их основе открывает путь к комплексному и «экономному» (по числу каналов связи) теплотехническому и иному эксперименту. Представляют самостоятельную ценность конструкции датчиков и приборов, созданных при выполнении работы и апробированных в ходе экспериментов, включая крупномасштабные.

На защиту выносятся:

1. Результаты исследования динамических характеристик ГДТП: постоянной времени, независимой от толщины датчика, а также модели тепловых процессов в ГДТП при нестационарных тепловых воздействиях.
2. Данные о средних и местных коэффициентах теплоотдачи и плотностях теплового потока при теплообмене на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра (гладкой и с турбулизаторами), облуненных поверхностях, траншеях, кавернах, протяженных вертикальных пластинах, поверхностях,

подвергающихся радиационному нагреву, поверхностях камер сгорания дизельного двигателя и ударных труб, а также установленные в ходе этих исследований качественные показатели (интенсификация теплообмена, наличие застойных зон, характер пульсаций теплового потока и т.п.).

3. Конструкция, физические модели, методы градуировки и результаты испытаний устройств на основе ГДТП: чувствительного элемента для регистрации теплового излучения, схем измерения температуры без внешнего источника электрического тока, устройства для измерения касательных напряжений трения, корреляционного расходомера и индикатора движения жидкости.
4. Расчетные схемы и оценки возможностей применения ГДТП для определения теплофизических характеристик материалов, степени черноты поверхностей, а также параметров электрических цепей.

Достоверность результатов подтверждается их соответствием данным специальной и справочной литературы, использованием стандартной и аттестованной аппаратуры, проведением опытов в различных условиях и участием в обсуждении высококвалифицированных специалистов.

Личный вклад диссертанта выразился в постановке основных задач исследования, выработке методологии, руководстве экспериментом и участием, как в его проведении, так и в обсуждении результатов, в формулировке и обобщении полученных данных.

Апробация работы. Отдельные части и работа в целом докладывались и обсуждались на:

- семинаре Петербургского отделения международной энергетической академии ядерного общества С.-Петербурга «Эффективные системы теплоснабжения в муниципальном и индивидуальном строительстве». Санкт-Петербург, 1997 г.;
- 11 международной конференции по теплообмену. Кюнджу, Корея. 1998.;
- Второй Российской национальной конференции по тепломассообмену. Москва, 1998 г.;
- XII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Москва, 1999 г.;
- научном семинаре под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физико-технические проблемы энергетики». Москва, ИВТ РАН, 1999 г.;
- выездном семинаре Национального комитета РАН по тепломассообмену под руководством академика РАН А.И. Леонтьева по вопросам измерений в теплофизике. Санкт-Петербург, ГОУ ВПО «СПбГПУ», 2004 г.;
- научном семинаре в ОАО НПО «ЦКТИ им. И. И. Ползунова», Санкт-Петербург, 2000 г.;
- научном семинаре кафедры теоретических основ теплотехники ГОУ ВПО «СПбГПУ», 2000, 2003, 2004 гг.
- XIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального

- и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Санкт-Петербург, 2001 г.;
- XIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». Рыбинск, 2003 г.;
  - Третьей Российской национальной конференции по тепломассообмену. Москва, 2002 г.;
  - 4-ом Минском международном форуме по тепломассообмену. Минск, 2000 г.
  - XL Крыловских чтениях. Санкт-Петербург, 2001 г.
  - 5 Международной конференции по экспериментальному теплообмену, механике жидкости и термодинамике. Салоники, Греция. 2001.
  - XXVI Сибирском теплофизическом семинаре. Новосибирск, 2002.
  - XXVII Сибирском теплофизическом семинаре. Новосибирск, 2004.
  - 3 европейской конференции по термическим исследованиям. Хайдельберг, Германия. 2000.
  - Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». Москва, 2004 г.
  - 43 AIAA аэрокосмический семинар и выставка. Рено, США. 2005.

Публикации. Общее количество работ, опубликованных по теме диссертации – 29, в том числе 1 монография, 9 статей в научных журналах, 16 докладов в трудах российских и международных конференций, 2 - в сборниках научных трудов; тезисов докладов - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, списка обозначений, пяти глав, заключения, выводов и списка использованной литературы из 162 наименований. Общий объем диссертации – 227 с., включая 67 рисунков и 3 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проблемы, дана общая характеристика работы. Формируются цели исследования, приводится краткое изложение содержания диссертации.

Глава 1 включает обзор датчиков теплового потока типа вспомогательной стенки, указывает место ГДТП среди аналогов, определяет связи в системе «уровень сигнала – ГДТП – аппаратура» и содержит сведения о современном мировом парке датчиков теплового потока.

Измерение теплового потока (теплетрия) объединяет весьма широкий спектр методов, включающий калориметрию, измерение джоуль-ленцевых эффектов, тепловыделений от внутренних тепловых источников и др.

Для большей определенности сузим обсуждаемую тему:

1. Поведем речь об измерении местной плотности теплового потока.
2. Предположим, что в зоне измерений расположено постороннее тело – дат-

чик теплового потока (ДТП) типа вспомогательной стенки.

Это – элемент пластины, цилиндрической, сферической или иной оболочки, расположенной меньшим размером нормально к изотермическим поверхностям – либо на поверхности тела, либо внутри него. Большинство ДТП этого типа представляют собой пластины, на поверхностях которых расположены спаи дифференциальной термопары – «обычной» или многоспайной батареи («гипертермопары»), включающей десятки, сотни, а иногда и тысячи спаев (рис. 1,а). Под действием теплового потока на поверхностях пластины

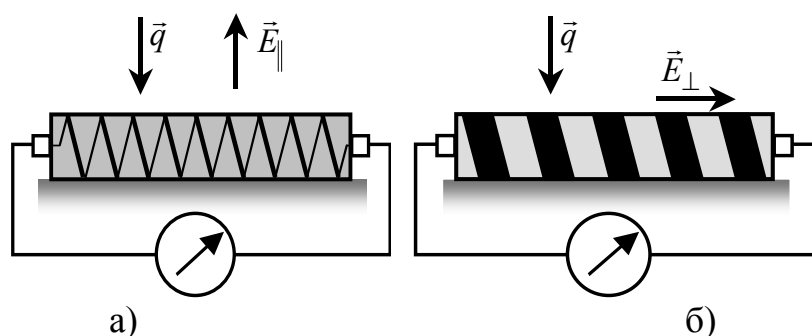


Рис. 1. ДТП продольного (а) и поперечного (б) типов сигнал ДТП  $E_{\parallel}$  пропорционален перепаду температур в направлении вектора теплового потока  $\vec{q}$ . Этот датчик мы назвали ДТП продольного типа.

возникает разность температур, и дифференциальная термопара генерирует сигнал, пропорциональный этой разности. Здесь реализуется продольный эффект Зеебека: сигнал ДТП  $E_{\parallel}$  пропорционален перепаду температур в направлении вектора теплового потока  $\vec{q}$ . Этот датчик мы назвали ДТП продольного типа.

Существуют, однако, и принципиально иные ДТП типа вспомогательной стенки (рис. 1,б); они выполнены из материалов с анизотропией теплопроводности и коэффициентов термо-э.д.с. В сечениях датчика, нормальных вектору теплового потока, возникает разность температур и генерируется пропорциональная этой разности термо-э.д.с.  $E_{\perp}$ . Здесь проявляется менее известный поперечный эффект Зеебека. Датчики из анизотропных материалов мы отнесли к ДТП поперечного типа. Поскольку, на основании закона Фурье, тепловой поток пропорционален градиенту температуры, в настоящей работе предложен термин «градиентные датчики теплового потока» (ГДТП).

Действие ГДТП основано на возникновении поперечной компоненты электрического поля в кристалле с анизотропными теплопроводностью и коэффициентом термо-э.д.с. при прохождении теплового потока в направлении, не совпадающем с главными осями кристалла.

Исходным материалом для ГДТП служат параллелепипеды, вырезанные из кристалла под определенным, близким к оптимальному, углом  $\theta$ , их называют анизотропными термоэлементами (АТЭ). На рис. 2 показано, что угол  $\theta$  не совпадает с главными кристаллографическими осями  $C_1$  и  $C_3$ .

Поскольку АТЭ обладает анизотропией теплопроводности, вектор теплового потока во всех сечениях, кроме плоскости  $z = 0$ , будет отклоняться от оси  $z$ . Это означает, что разность температур возникает не только в направлении оси  $z$ , но и в направлении оси  $x$ , вдоль которой возникает термо-э.д.с.  $E_x$ , которая пропорциональна градиенту  $\partial T / \partial z$ , то есть, на основании закона Фурье, плотности теплового потока  $q_z$ :

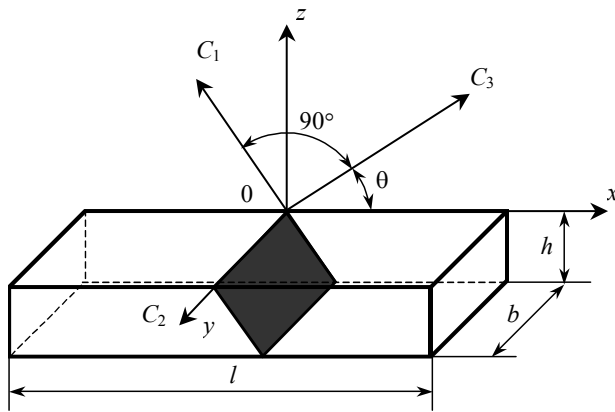


Рис. 2. Анизотропный термоэлемент (АТЭ):  $l \times b \times h$  – габариты;  $C_1, C_2, C_3$  – кристаллографические оси

$$E_x = \frac{(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \sin \theta \cos \theta \cdot F q_z}{\sqrt{\lambda_{33}^2 \sin^2 \theta + \lambda_{11}^2 \cos^2 \theta} \cdot b},$$

где  $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{33}$  – коэффициенты термо-э.д.с. в направлении главных осей  $C_1$  и  $C_3$ , соответственно,  $\lambda_{11}, \lambda_{33}$  – составляющие тензора теплопроводности в тех же направлениях,  $F$  – площадь АТЭ в плане.

ГДТП, применяемые в настоящей работе, впервые

созданы Н.П. Дивиным. В их конструкции использованы анизотропные монокристаллы висмута чистоты 99,99%. Висмут относится к веществам с ярко выраженной анизотропией физических свойств, его монокристаллы обладают анизотропией теплопроводности и коэффициентов дифференциальной термо-э.д.с. ГДТП из висмута имеют вольт-ваттную чувствительность  $S_0 = 5 \dots 60$  мВ/Вт, постоянную времени  $\tau_{\min} \approx 10^{-9} \dots 10^{-8}$  с; диапазон их рабочих температур – от 20 до 544 К (верхний предел соответствует точке плавления висмута).

На рис. 3 изображен батарейный ГДТП, включающий АТЭ 1 из висмута. «Зеркальное» чередование тригональных плоскостей в двух соседних АТЭ обеспечивает суммирование возникающих в них термо-э.д.с. Батарею обычно монтируют на подложке 2 из слюды. Друг от друга АТЭ изолированы тонкими (5 мкм) прокладками, например, из лавсана 5 и удерживаются на подложке 2 клеем (БФ-2 или аналогичным по вязкости). Спаи из чистого

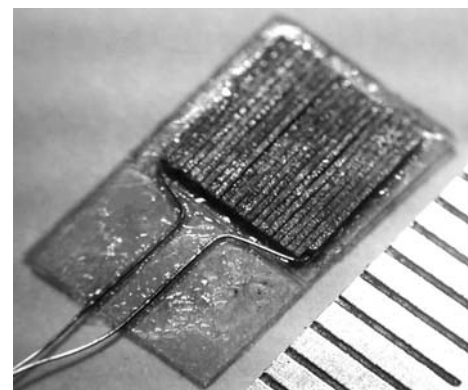
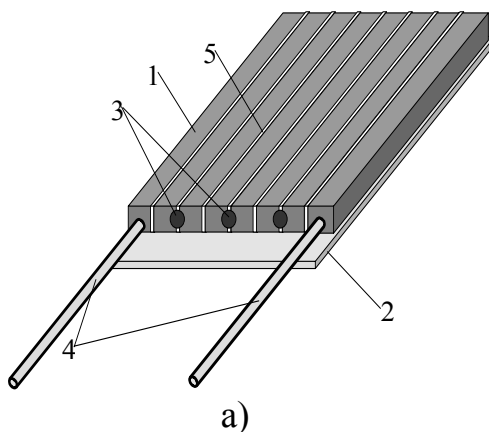
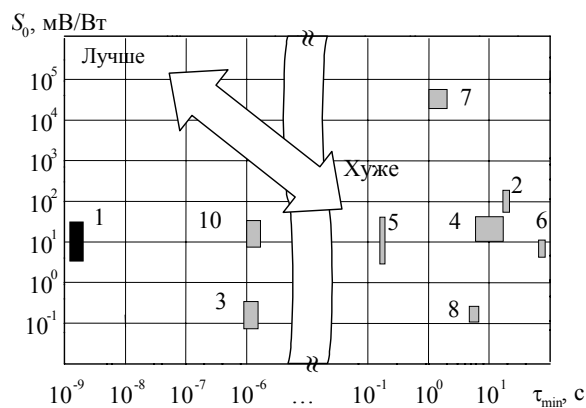


Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) ГДТП конструкции Н.П. Дивина (шкала в мм): 1 – АТЭ; 2 – подложка из слюды;

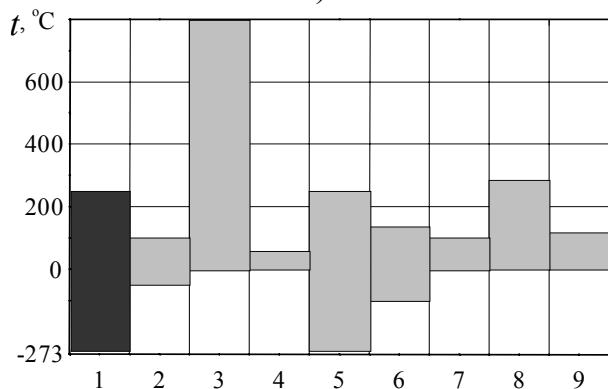
3 – спаи из чистого висмута; 4 – токовыводы; 5 – лавсановые прокладки

висмута 3 соединяют термоэлементы в последовательный контур. Крайние термоэлементы снабжены токовыводами 4. Батареиные ГДТП имеют разме-

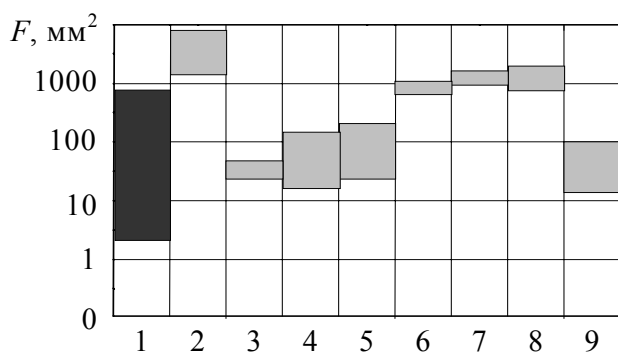




а)



б)



в)

Рис. 4. Характеристики ДТП по чувствительности, быстродействию (а), по температурному диапазону (б), по площади (в).

Цифрами обозначены:

1 – ГДТП на основе висмута; 2 – датчик ИТТФ НАН Украины; 3 – датчик фирмы «Vatell» (США); 4 – датчик фирмы «Wuntronic» (ФРГ); 5 – датчик фирмы «Сартес» (Франция); 6 – датчик фирмы «Hukseflux» (Нидерланды); 7 – датчик лаборатории физической электроники (Швейцария); 8 – датчик фирмы «Newport» (США); 9 – датчик фирмы «TNO» (Голландия); 10 – датчик ALTP фирмы «FORTECH HTS GmbH»(ФРГ)

ры в плане от 1×1 мм до 10×10 мм и более, минимальная их толщина к настоящему времени снижена до 0,1 мм, и создание более тонких датчиков наталкивается на существенные технологические сложности.

ГДТП градуируют абсолютным методом, по джоуль-ленцеву тепловому потоку. Градуировка возможна вплоть до точки плавления висмута. Линейность градуировочной характеристики (рис. 4) сохраняется при внешнем давлении до 30 МПа; изменение чувствительности ГДТП в зависимости от температуры не превысило 3%.

К основным параметрам, определяющим технические возможности ДТП и, как следствие, их привлекательность для потребителей, относятся:

1. вольт-ваттная чувствительность;
2. быстродействие;
3. диапазон рабочих температур;
4. диапазон размеров в плане.

Кроме того, на технический уровень ДТП влияют стойкость к агрессивным средам, механическая прочность, возможность массового производства и т.д. Сопоставление характеристик современных ДТП с параметрами ГДТП из висмута представлено на рис. 4, а-в.

Как следует из рис.4,а, вольт-ваттная чувствительность ГДТП на осно-

ве висмута заметно (на 3...4 порядка) уступает лишь опытному образцу, созданному в лаборатории промышленной электроники (Швейцария). Однако швейцарский аналог имеет жестко заданные размеры платы (35×35 мм), что заметно сужает круг возможного применения. Датчики ИТТФ НАН Украины чувствительнее ГДТП примерно на порядок; применение современных цифровых преобразователей (см. ниже) делает такое различие несущественным.

Из рис. 4,б видно, что, кроме ГДТП, лишь датчик французской фирмы «Captec» способен работать при криогенных температурах. В то же время датчик американской фирмы «Vatell» значительно превосходит ГДТП из висмута по верхнему температурному уровню.

Из рис. 4,в следует, что площади современных ДТП не опускаются ниже 4 мм<sup>2</sup>. Для ГДТП это значение удастся снизить в 4...5 раз; в то же время максимальная площадь ограничена лишь трудоемкостью и стоимостью изготовления.

В главе 1 обсуждаются также связи размеров  $F_{\min}$  ГДТП, предполагаемой плотности измеряемого теплового потока  $q$  и разрядности цифровой аппаратуры  $k$ . Уровень регистрируемого сигнала  $E_0$  должен на несколько порядков превысить уровень собственных шумов ГДТП  $E^*$  (эта величина приближается к  $10^{-9}$ В и близка к уровню тепловых шумов в чистых металлах). В работе показано, что разрешающая способность схемы должна находиться в интервале

$$\frac{E_{\max}}{K_y \cdot 2^k} \geq E_0 \geq 10^m \cdot E^*,$$

где  $E^*$  – уровень тепловых шумов;  $m$  – коэффициент запаса, позволяющий надежно отличать полезный сигнал от теплового шума (с учетом 1% - точности при градуировке ГДТП можно принять  $m = 2$ );  $E_{\max}$  – верхний предел измерения для выходного сигнала  $E$ .

С учетом сказанного ясно, что сигнал датчика  $E_{\text{д}} \approx 10^n E_0$  (здесь  $n \approx 2...3$  – «коэффициент запаса») должен иметь уровень

$$E_{\text{д}} = 10^n \frac{E_{\max}}{K_y 2^k},$$

а требуемая разрядность аналого-цифрового преобразователя составляет

$$k \geq 3,321 \cdot \left( n - \lg \frac{F_{\min} K_y S_0 q}{E_{\max}} \right).$$

Таким образом, ГДТП на основе висмута представляют интерес для экспериментаторов, но их характеристики (в первую очередь - динамические) требуют специального исследования.

Глава 2 посвящена исследованию динамических характеристик ГДТП. В ней описаны экспериментальные установки для определения постоянной времени датчика, предложены тепловые модели, описывающие динамику процессов в ГДТП, обсуждаются результаты натурных экспериментов.

Измерение теплового потока в нестационарном режиме представляет первостепенный интерес, поскольку даже в процессах, которые принято счи-

тять стационарными, тепловой поток подвержен флуктуациям различной природы. Так как изменение теплового потока во времени может происходить по любому закону, обычно рассматривают, как связан сигнал датчика  $q_n(\tau)$  со скачкообразным изменением измеряемой величины  $q$  от 0 до  $q_{\max}$ .

Экспериментальные исследования переходных характеристик ГДТП проводились с помощью импульсных лазеров Delta-201 и ОГМ - 20, которые работали в режимах свободной генерации и модулированной добротности при следующих параметрах: для лазера Delta-201 длина волны – 1,06 мкм; длительность импульса – 0,15 мс; мощность излучения – 1250 кВт/м<sup>2</sup>, для ОГМ – 20 - длина волны – 693,4 нм; длительность импульса – 30 нс и 400 мкс; мощность излучения – 10<sup>7</sup> Вт. В качестве контрольных датчиков использовались фотодиоды типа ФД-2 и фотоэлектронные умножители (ФЭУ).

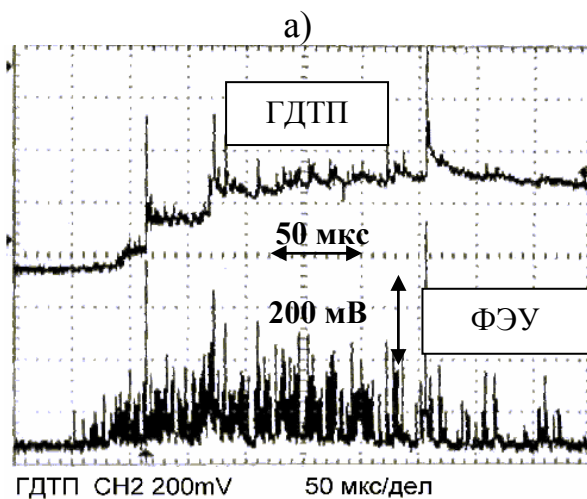
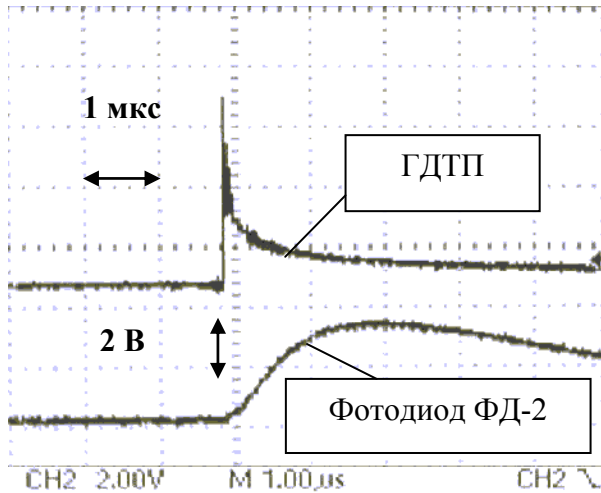


Рис. 5. Пример протокол-фотографии экрана осциллографа «ТЕКТРОНИХ» при синхронной записи сигналов в режиме свободной генерации:  
 а – ГДТП и фотодиода ФД-2;  
 б – ГДТП и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)

Регистрация сигналов ГДТП и контрольных датчиков проводилась запоминающими аналоговыми и цифровыми осциллографами типа С8-17, С1-94 и фирмы «ТЕКТРОНИХ».

Опыты проводились на ГДТП с размерами 4×7мм и 5×5 мм и толщиной 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 и 4,0 мм с вольт-ваттной чувствительностью 10-15 мВ/Вт. Поверхность датчиков была покрыта специальным составом со степенью черноты 0,98. Результаты опытов для всех датчиков оказались практически одинаковыми: было установлено, что постоянная времени от толщины ГДТП не зависит.

На рис. 5 представлены (в различных масштабах по времени) результаты измерений теплового потока в обоих режимах генерации. Видно, что ГДТП намного точнее, чем фотодиод, показывает, как меняется мощность даже в наносекундном диапазоне. Измерения на максимуме временного разрешения показали (рис.6), что ГДТП позволяет детализировать особенности процесса при временах порядка 10<sup>-7</sup> с, что на 1...2 порядка меньше характерных времен большинства процессов теплообмена.

Измерения на максимуме временного разрешения показали (рис.6), что ГДТП позволяет детализировать особенности процесса при временах порядка 10<sup>-7</sup> с, что на 1...2 порядка меньше характерных времен большинства процессов теплообмена.

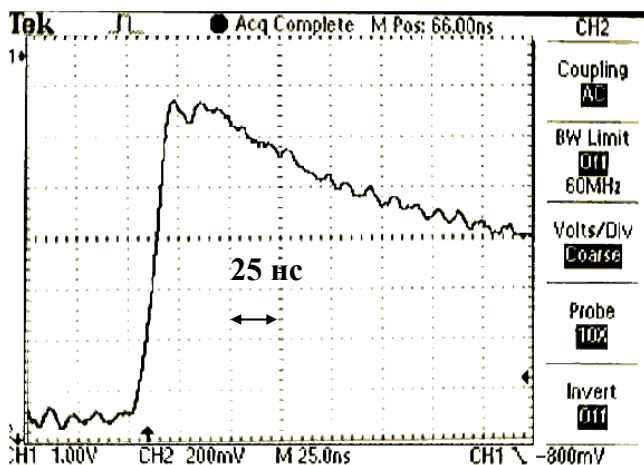


Рис. 6. Результаты измерения теплового потока – импульс 30 нс (фотография экрана осциллографа «ТЕКТРОНИХ»)

показывают, что формирование термо-э.д.с. в нестационарном режиме происходит в весьма тонком поверхностном слое висмута. Природа этого явления до настоящего времени не изучена; обсуждение вопроса возможно, на наш взгляд, лишь с использованием аппарата физики твердого тела, методологии неравновесной термодинамики и т.д., что выходит за рамки возможностей и задач настоящей работы.

В то же время, можно показать, что достигнутый уровень быстродействия не противоречит представлениям теории теплопроводности.

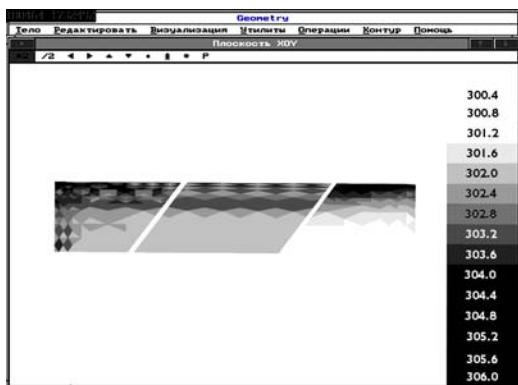


Рис. 7. Моделирование поля температуры в анизотропной пластине методом конечных элементов. Слева – шкала температур (в К)

которых получены решения краевых задач теплопроводности. Показано также, что в диапазоне чисел Фурье, характерных для нашей задачи, усложнение модели не оправдано, а потому можно ограничиться решением для полуограниченного тела, разогреваемого внешним тепловым потоком постоянной плотности.

Расчет показал, что формирование термо-э.д.с. происходит в слое толщиной около  $5 \cdot 10^{-7}$  м, что возможно как с позиций теории термоэлектриче-

Стой высокий уровень быстродействия ГДТП не позволяет достаточно точно (до  $1 \dots 10\%$ ) определить  $\tau_{\min}$ . Можно лишь утверждать, что постоянная времени ГДТП на основе монокристаллического висмута имеет уровень  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  с, а это делает такие датчики практически безынерционным инструментом для теплотехнических исследований.

Результаты опытов

Численный эксперимент (рис. 7) показывает, что анизотропия теплопроводности заметно искривляет изотермические сечения АТЭ лишь у краев. Не равный нулю, но весьма малый наклон изотерм позволяет «для кристалла в целом» использовать аппарат теории теплопроводности изотропной среды с эффективными тепло- и температуропроводностью  $\lambda$  и  $a$ , соответственно.

В главе предложена градация моделей (полуограниченное тело, одно- и двухслойная пластина), для

ских явлений, так и по представлениям о взаимодействии излучения с веществом.

Реализуемый подход позволил также сопоставить возможности ДТП продольного и поперечного типов в стационарной и нестационарной теплотометрии.

Принципиальное различие двух типов датчиков состоит в том, что ГДТП формирует сигнал  $E_{\perp}$  в слое  $h_0 \ll h$ , а сигнал ДТП продольного типа  $E_{\parallel}$  пропорционален разности температур  $\Delta T_{\parallel}$  на всей толщине  $h$ :

$$E_{\perp} = S_{0\perp} \cdot F_{\perp} \cdot q_{\max} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo_0}}\right);$$

$$E_{\parallel} = S_{0\parallel} \cdot F_{\parallel} \cdot [T(0, \tau) - T(h, \tau)] = S_{0\parallel} \cdot F_{\parallel} \cdot \Delta T_{\parallel},$$

где индексы  $\parallel$  и  $\perp$  относятся к соответствующим типам ДТП, а  $Fo_0 = \frac{a\tau}{h_0^2}$  - число Фурье для ГДТП.

Известно, что

$$\Delta T_{\parallel} = \frac{2q_{\max} \cdot h}{\lambda} \cdot \sqrt{Fo_h} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo_h}} \right) = q_{\max} \cdot \frac{h}{\lambda} \cdot \varphi(Fo_h),$$

где  $Fo_h = \frac{a\tau}{h^2}$ ;  $\varphi(Fo_h) = 2\sqrt{Fo_h} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \operatorname{ierfc} \frac{1}{2\sqrt{Fo_h}} \right)$ .

Графики функций  $\varphi(Fo_h)$  и  $\operatorname{erfc}\left(\frac{1}{2\sqrt{Fo}}\right)$  представлены на рис. 8. Как видим, функция  $\varphi(Fo_h)$  достигает уровня 0,98 – 0,99, соответствующего погрешности измерений в 1...2%, только при  $Fo_h > 100$ .

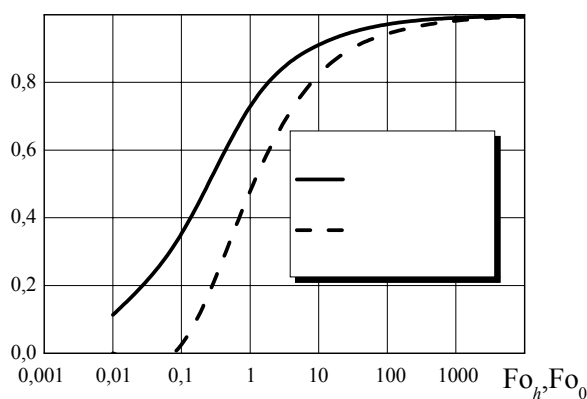


Рис. 8. Графики функций  $\varphi(Fo_h)$  и  $\operatorname{erfc}\frac{1}{2\sqrt{Fo_0}}$

В работе сделаны оценки инерционности ДТП конструкции ИТТФ НАН Украины и ГДТП на основе висмута. Показано, что при нестационарной теплотометрии ГДТП превосходит ДТП продольного типа по чувствительности почти на два порядка (разница в быстродействии обсуждалась в гл. 1 и представлена на рис. 4,а).

В стационарной теплотометрии быстродействие ГДТП роли, конечно, не играет, но малая толщина (0,1...0,2 мм) определяла их термическое сопротивление уровнем  $3,5 \cdot 10^3$  (м<sup>2</sup>К)/Вт; для рассмотренных выше ДТП продольного типа эта величина составляет около  $2 \cdot 10^3$  (м<sup>2</sup>К)/Вт.

Следовательно, в стационарном тепловом режиме ГДТП искажает поле температуры намного меньше, чем ДТП продольного типа.

Глава 3 касается применения ГДТП в исследовании теплообмена на поверхностях поперечно обтекаемого цилиндра, пластины со сферическими и вытянутыми лунками, траншеями и кавернами, вертикальной нагретой пластины и поверхностей в ударных трубах.

До середины 90-х гг. ГДТП в теплотехническом эксперименте сколько-нибудь широко не использовались.

С учетом долговременной (свыше 30 лет) стабильности абсолютной градуировки и установленного уровня постоянной времени в первую очередь необходимо тестировать ГДТП на классических экспериментальных задачах теплообмена и убедиться, что результаты не приносят неожиданностей. При этом высокое быстродействие ГДТП позволит получить дополнительную информацию о пульсациях теплового потока на поверхности; применимость таких результатов также нуждается в обсуждении.

#### Теплообмен при поперечном обтекании цилиндра.

Использование ГДТП позволяет определить местное (в пределах площади датчика) значение коэффициента теплоотдачи непосредственно по сигналу датчика  $E_x$ :

$$\alpha = \frac{q}{(T_w - T_f)} = \frac{E_x}{S_0 F (T_w - T_f)}.$$

Поскольку для цилиндра диаметром  $d$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d}{\lambda_f} = \frac{qd}{(T_w - T_f)\lambda_f} = \frac{E_x d}{S_0 F \lambda_f (T_w - T_f)} = E_x \frac{d}{S_0 F \lambda_f (T_w - T_f)},$$

ГДТП можно условно считать «нуссельтомером»: при правильной градуировке «шкалы прибора» он определяет именно величину  $\text{Nu} = \text{const} \cdot E_x$ .

Первый этап экспериментов по исследованию конвективного теплообмена при поперечном обтекании изотермического цилиндра проходил в лаборатории кафедры «Гидроаэродинамика» СПбГПУ. Замкнутая аэродинамическая труба с открытой рабочей частью обеспечивала в струе между круглым соплом диаметром 500 мм и диффузором низкий уровень турбулентности ( $Tu \leq 0,77\%$ ). Скорость воздуха в рабочей части трубы определялась с помощью трубки Прандтля и микроманометра; в наших опытах средняя скорость потока достигала 25 м/с.

В рабочей части аэродинамической трубы мы устанавливали круглые гладкостенные стальные цилиндры 2 (рис. 9,а,б) диаметром 25, 66 и 166 мм, длиной 500 мм, с толщиной стенки 0,1 мм. (Столь малая толщина определялась выбором материала и, как показали опыты, практически не снижала жесткости цилиндра при обдуве).

Снизу в цилиндр 2 по трубе 4 подавался сухой насыщенный пар из парогенератора; давление пара контролировалось манометром 6. По трубке 5 конденсат сливался в конденсатосборник. Таким образом, поверхность теплообмена имела температуру, близкую к температуре насыщения пара. Ци-

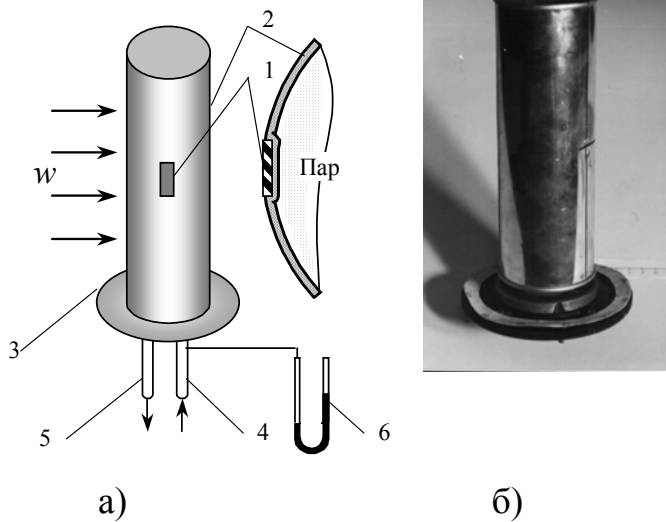


Рис. 9. Цилиндр, использовавшийся в опытах: а – схема; б – общий вид. Цифрами обозначены: 1 – ГДТП; 2 – цилиндр; 3 – стол с лимбом угломера; 4 – подвод пара; 5 – слив конденсата; 6 – U-образный манометр; 7 – датчик термоанемометра

линдры 2 монтировались на специальном вращающемся столе 3 со шкалой, цена деления которой составляла  $1^\circ$ . Стол позволял поворачивать цилиндр с закрепленным на нем ГДТП на определенный угол относительно набегающего потока. ГДТП размерами  $4 \times 7 \times 0,2$  мм,  $5 \times 5 \times 0,2$  мм,  $15 \times 2 \times 0,2$  мм устанавливались заподлицо с поверхностью цилиндров; вольт-ваттная чувствительность датчиков находилась в пределах  $9,8 \dots 20$  мВ/Вт.

Азимутальный угол, который перекрывали ГДТП, составлял для цилиндров диаметром 25 мм –  $18,5^\circ$ ; 66 мм –  $3,5 \dots 7^\circ$ ; 166 мм –  $2,8^\circ$ . Во время опыта цилиндр с ГДТП поворачивался вокруг оси на требуемый угол  $\varphi$ , при этом за начало отсчета принималась лобовая точка ( $\varphi = 0^\circ$ ).

Чтобы исследовать корреляцию между пульсациями скорости и теплоотдачи, на удалении 1,5 мм от ГДТП (и на том же угле  $\varphi$ ) помещался термоанемометр. Запись его показаний велась одновременно с записью пульсаций теплового потока.

В первой серии опытов были, кроме того, записаны пульсации статического давления на стенке цилиндра. Ход кривых соответствует традиционным представлениям об аналогии Рейнольдса. Измерение, запись и обработка экспериментальных данных выполнялись измерительно-вычислительным комплексом на базе персонального компьютера. Погрешность в определении локального коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  не превышала 2,0%.

Показатели осредненные во времени и средние коэффициенты чисел Рейнольдса  $Re = 5 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^5$

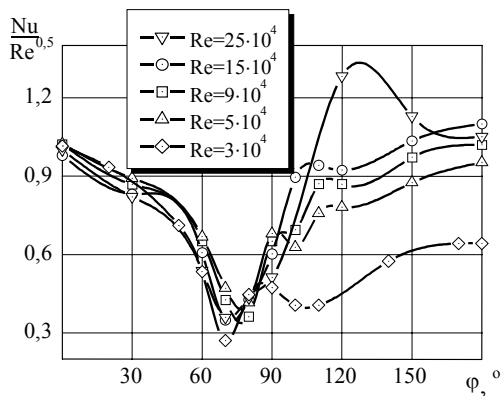


Рис. 10. Безразмерные кривые, характеризующие изменение местного коэффициента теплоотдачи на изотермической поверхности поперечно обтекаемого цилиндра

коэффициента теплоотдачи убывает (вследствие гаснет минимума при  $\varphi = 70^\circ \dots 80^\circ$ . увеличивается и турбулизация повышает

Полученные результаты достаточно близки к многочисленным данным исследований, признанных надежными. Несмотря на существенное или даже коренное различие в методологии и технических средствах измерения, хорошее соответствие наблюдается во всех случаях, включая минимальные значения  $Nu$  вблизи  $\varphi = 85^\circ$ . Это подтверждает правильность оценки усредненных во времени и пульсирующих чисел Нуссельта в эксперименте. В распределениях  $Nu$  в области  $\varphi = 110^\circ \dots 130^\circ$  имеется, в частности, площадка перед повторно присоединяющейся частью потока. В ходе обработки опытных данных получено уравнение  $\overline{Nu} = 0,29 Re^{0,55}$ .

В современном вычислительном эксперименте велика и постоянно возрастает потребность в верификации расчетов. Особенно важно иметь опытные данные по пульсационным характеристикам скорости, давления, температуры, теплового потока в турбулентных течениях. Опыт, накопленный в ходе численных экспериментов, показывает, что при  $Re > 10^3$  применение без верификации современных моделей турбулентности практически невозможно, а при меньших значениях числа Рейнольдса значительно снижает доверие к данным компьютерного моделирования.

Наибольшее распространение в качестве инструмента верификации получили методы термоанемометрии, где в эксперименте удается записать пульсации температуры вблизи поверхности. Именно эти данные считают наиболее надежными, поскольку диаметр нити термоанемометра имеет порядок  $10^{-6}$  м, а постоянная времени –  $10^{-3}$  с.

Возможности ГДТП значительно больше – именно в силу различий в постоянной времени. В наших опытах каждое измерение выполнялось  $6 \cdot 10^4$  раз по  $2 \cdot 10^3$  измерений в секунду. Экспериментальные данные были обработаны в виде критерия интенсивности пульсаций плотности теплового потока:

$$\eta = \frac{\sqrt{q'_\varphi{}^2}}{\bar{q}_\varphi} \cdot 100\% \quad (\sqrt{q'_\varphi{}^2} - \text{среднеквадратичное значение пульсаций теплового потока при фиксированном угле } \varphi; \bar{q}_\varphi - \text{средняя плотность теплового потока при том же угле } \varphi).$$

Статистическая обработка экспериментальных данных по стандартным программам позволила получить в каждом опыте набор  $n$  значений средней плотности теплового потока  $q_i$ , которую можно считать дискретной и случайно меняющейся величиной. Целевой функцией в этом случае является дисперсия плотности теплового потока  $D$ :

$$D = \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1},$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение;  $\bar{q}$  – среднее арифметическое измеряемой плотности теплового потока.



Спектральная плотность пульсаций плотности теплового потока на фиксированном угле  $\varphi$  рассчитывалась по программе быстрого преобразования Фурье.

В ходе опытов установлено, что при  $\varphi = 0 \dots 60^\circ$  течение в пограничном слое ламинарное, а начиная с  $\varphi = 90^\circ$ , наблюдаются отдельные всплески пульсаций и переход к турбулентному течению. Характер пульсаций сохраняется до задней критической точки ( $\varphi = 180^\circ$ ).

Отметим, что сходный характер пульсаций наблюдался и в работе [?], где на поверхности цилиндра располагался пленочный датчик термоанемометра.

На рис. 11 и 12 представлено частотное распределение пульсаций теплового потока для различных чисел Рейнольдса.

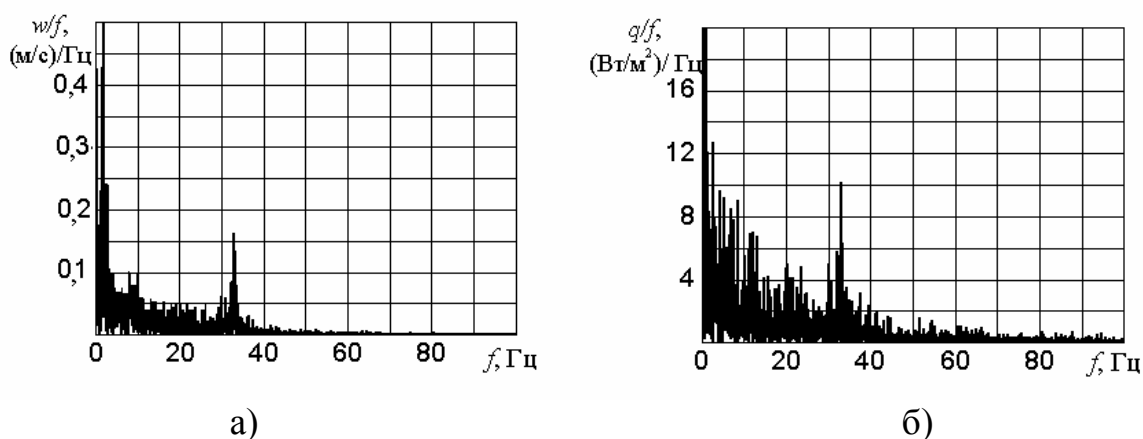
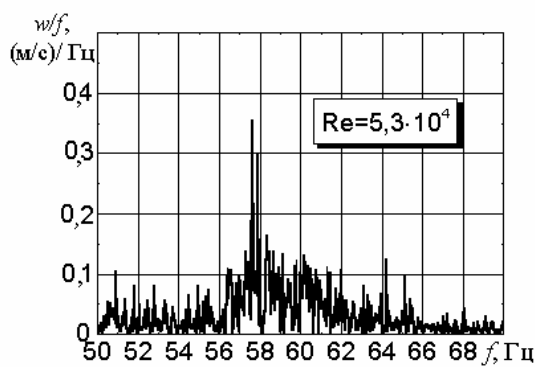
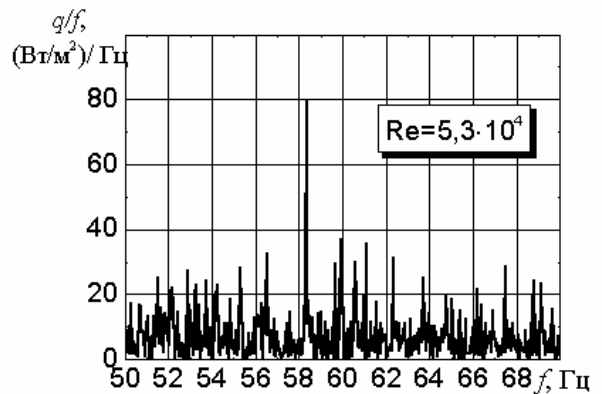


Рис. 11. Распределение спектра мощности пульсаций скорости (а) и плотности теплового потока (б) на угле  $\varphi = 150^\circ$  при  $Re = 3 \cdot 10^4$

По мере роста числа Рейнольдса максимум амплитуды пульсаций сдвигается в сторону больших частот, сама амплитуда при этом связана с частотой почти линейно. В этой области энергетические спектры имеют пики, соответствующие частоте отрыва вихрей. Эти особенности энергетического спектра в повторно присоединяющейся области потока соответствуют результатам численного моделирования, выполненного под руководством М.Х. Стрельца. Отчетливые максимумы на частотах 33,0 Гц и 58,0 Гц достигают 250 (Вт/м<sup>2</sup>)/Гц при  $\varphi = 150^\circ$ , что с точностью до 0,1 Гц совпадает с максимумами в энергетических спектрах скорости. Частота отрыва вихрей также совпадает с частотами, рассчитанными в работе ? по числам Струхалия с учетом степени загромождения потока ( $Sh = 0,316$ ).



а)



б)

Рис.12. Разделение спектра мощности пульсаций скорости (а) и плотности теплового потока (б) при  $\varphi = 150^\circ$  и  $Re = 5,3 \cdot 10^4$

Зависимость интенсивности пульсаций  $\eta$  и дисперсии плотности  $D$  для теплового потока от угла  $\varphi$  представлены на рис.13и 14.

В пределах ламинарного течения в пограничном слое интенсивность пульсаций и дисперсия плотности теплового потока сохраняют минимальные и почти постоянные значения (около 4% для  $\varphi \leq 60^\circ$ ). Рост обеих характеристик наблюдается сразу за точкой отрыва, в области, где местные коэффициенты теплоотдачи минимальны, этот рост достигает 15...20% вблизи задней критической точки ( $\varphi = 180^\circ$ ). На кривых наблюдаются локальные минимумы и максимумы в районе  $\varphi = 110...130^\circ$ , что свидетельствует о весьма сложном отрывном характере течения вблизи поверхности в этой зоне.

Вид кривых  $\eta(\varphi)$  и  $D(\varphi)$  (рис. 13, 14) согласуется с результатами известных работ [чьих!?] как качественно, так и количественно.

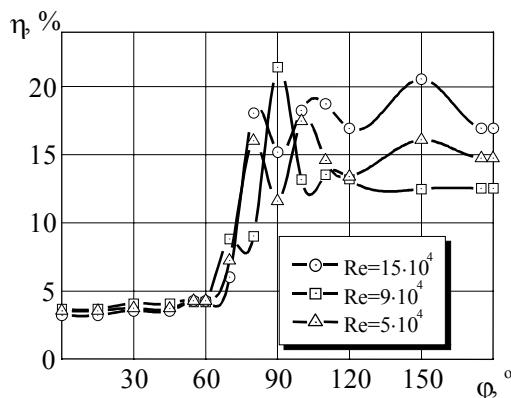


Рис. 13. Интенсивность пульсаций плотности теплового потока

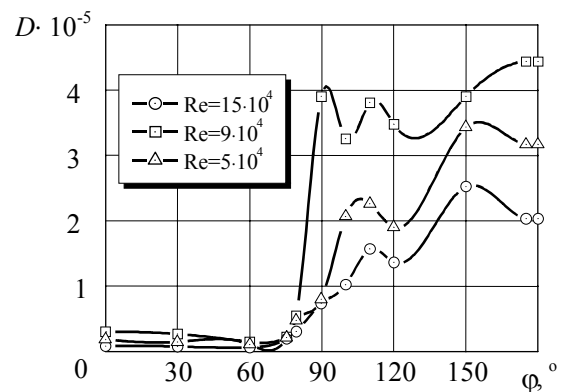


Рис. 14. Дисперсия плотности теплового потока

Применение ГДТП позволило определить местные коэффициенты теплоотдачи на круглом цилиндре при установке вдоль образующих турбулизаторов в виде проволок диаметром 1,5...2,0 мм.

На рис.15 приведены распределения местных коэффициентов теплоотдачи для гладкого цилиндра и цилиндра с турбулизаторами при  $Re = 9 \cdot 10^4$ .

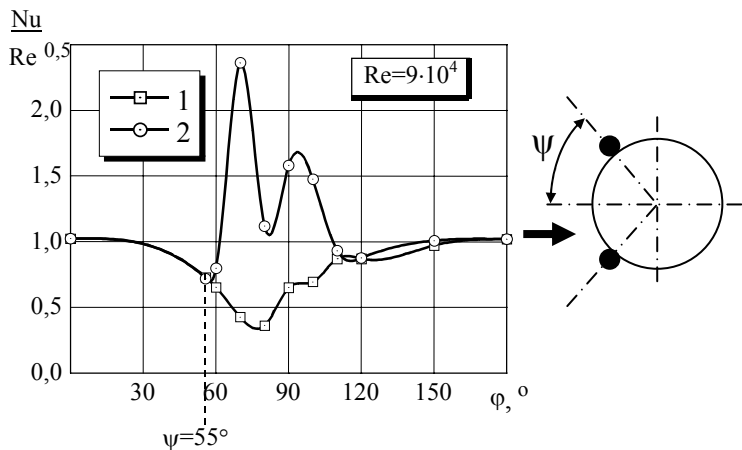


Рис. 15. Местные безразмерные коэффициенты теплоотдачи на поверхности гладкого цилиндра (1) и цилиндра с турбулизаторами, установленными под углами  $\psi = \pm 55^\circ$  к набегающему потоку (2)

дачи для гладкого цилиндра и цилиндра с турбулизаторами при  $Re = 9 \cdot 10^4$ . В ходе опытов был найден оптимальный угол установки турбулизаторов -  $\psi = \pm 55^\circ$ . Местный коэффициент теплоотдачи на угле  $\varphi = 70^\circ$  по сравнению с гладким цилиндром возрастает в 4,5 раза, а средний по окружности коэффициент теплоотдачи – в 1,25 раза.

Теплообмен на пластине с интенсификаторами

Для интенсификации теплообмена на пластине используют лунки (сферические и вытянутые), каверны различного сечения и т.д. Данные литературы об эффективности турбулизаторов нередко противоречивы.

Использование ГДТП позволило определить местные значения плотности теплового потока и коэффициентов теплоотдачи в ходе натурального эксперимента; это дало материал для обсуждения численных экспериментов.

ГДТП устанавливались на различных зонах турбулизаторов, а также на гладкой поверхности пластины: перед турбулизаторов (для сопоставления) и позади него (для того, чтобы оценить влияние турбулизатора на «шлейфовое» изменение коэффициента теплоотдачи). Схема опытов отличалась от представленной на рис. 9 только формой «коробки», моделировавшей нагреваемую паром поверхность.

Первая серия опытов была посвящена теплообмену в сферической лунке диаметром в 65 мм и глубиной 9 мм, размещенной на удалении 400 мм от входного сопла.

Местные коэффициенты теплоотдачи, определяемые на поверхности лунки, соотносились с коэффициентом теплоотдачи на гладкой поверхности перед лункой. Измерения были обработаны в виде зависимостей

$$\frac{\alpha_s}{\alpha_w} (Re), \quad \frac{q_s}{q_w} (Re),$$

(индекс «s» относится к величинам, измеряемым на сферической поверхности лунки, а индекс «w» – на плоскости;  $Re = \frac{wd}{v}$ , где  $d$  – диаметр лунки).

Коэффициент теплоотдачи в продольном сечении лунки сначала понижается, а затем, ближе к задней кромке, возрастает (относительно  $\alpha_w$ ) в 1,8...1,95 раза (рис. 16,а). В поперечном сечении для всех исследо-

ванных чисел Рейнольдса коэффициент теплоотдачи возрастает и достигает максимума на радиусе 16 мм ( $Re=2,5 \cdot 10^4$ ) или в центре лунки ( $Re=4,2 \cdot 10^4$  и  $Re=6,4 \cdot 10^4$ ) (рис. 16,б). Как видим, методика численного моделирования нуждается в уточнении.

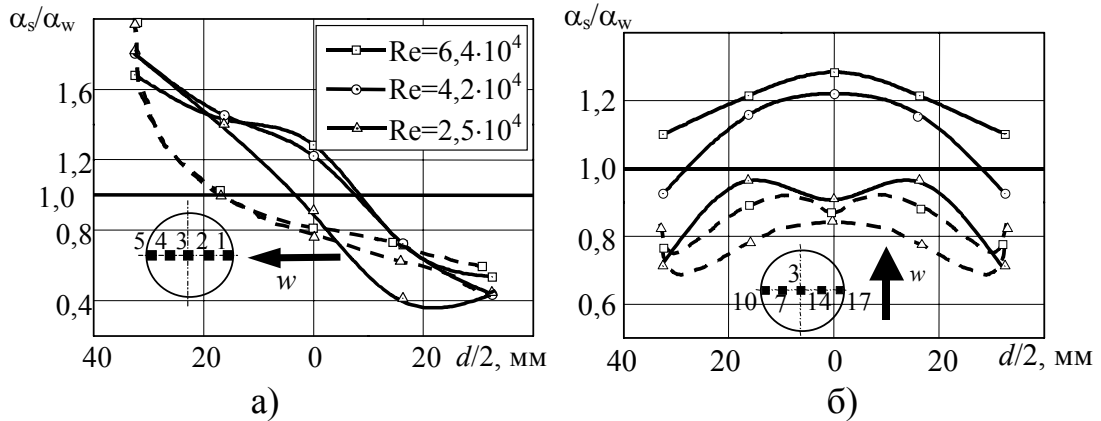


Рис. 16. Изменение относительных местных коэффициентов теплоотдачи по продольному (а) и поперечному (б) центральным сечениям лунки.

Штриховыми линиями обозначены данные численного моделирования, полученные С.А. Исаевым и др.

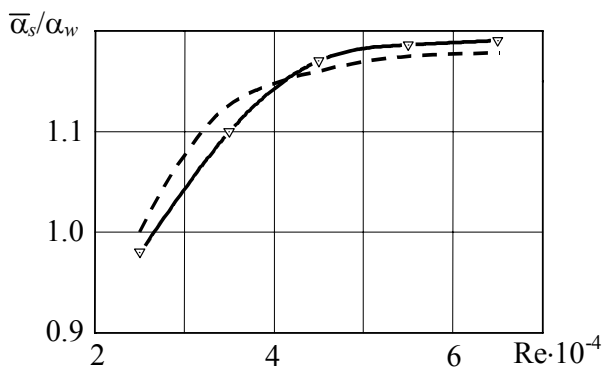


Рис. 17. Относительные средние коэффициенты теплоотдачи в сферической лунке. Штриховыми линиями обозначены данные С.А. Исаева и др.

Получены также усредненные по поверхности лунки безразмерные коэффициенты теплоотдачи  $\bar{\alpha}_s$  (рис. 17).

Видно, что при  $Re < 2,6 \cdot 10^4$  лунка неэффективна, а уже при  $Re = 6,5 \cdot 10^4$  повышает теплоотвод на 19%. Совпадение с данными численного моделирования в этих опытах лучше, чем в предыдущих.

В следующей серии опытов определялись местные коэффициенты теплоотдачи позади лунки;

размещение ГДТП представлено на рис.18.

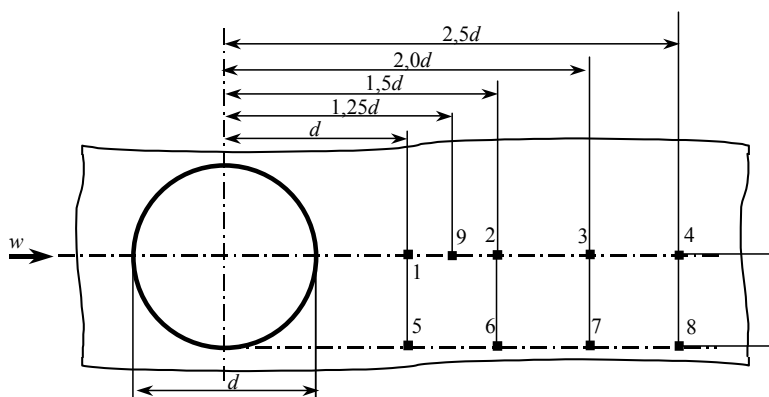


Рис. 18. Размещение ГДТП при измерении тепловых потоков на плоскости позади сферической лунки

История потока такова, что на расстоянии до  $2d$  за лункой не происходит «успокоения» течения (рис.19). Таким образом, если установить следующую лунку на этом расстоянии, она окажется в возмущенном потоке.

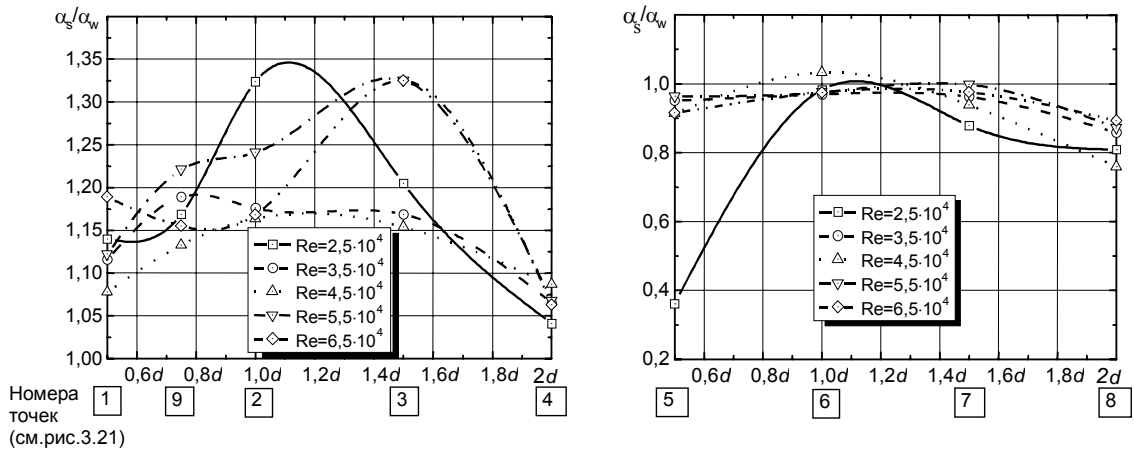


Рис. 19. Относительные местные коэффициенты теплоотдачи на пластине позади сферической лунки: в квадратиках – места установки ГДТП, соответствующие рис.18

Попытки распространить численное моделирование на асимметричные лунки потребовали экспериментов для верификации. В модели С.А. Исаева и др. и наших опытах исследовалась лунка (рис.20,а) с соотношением размеров  $h/d = 0,13$ ,  $l/d = 0,5$ ,  $\varphi = 45^\circ$ , при  $d = 68$  мм).

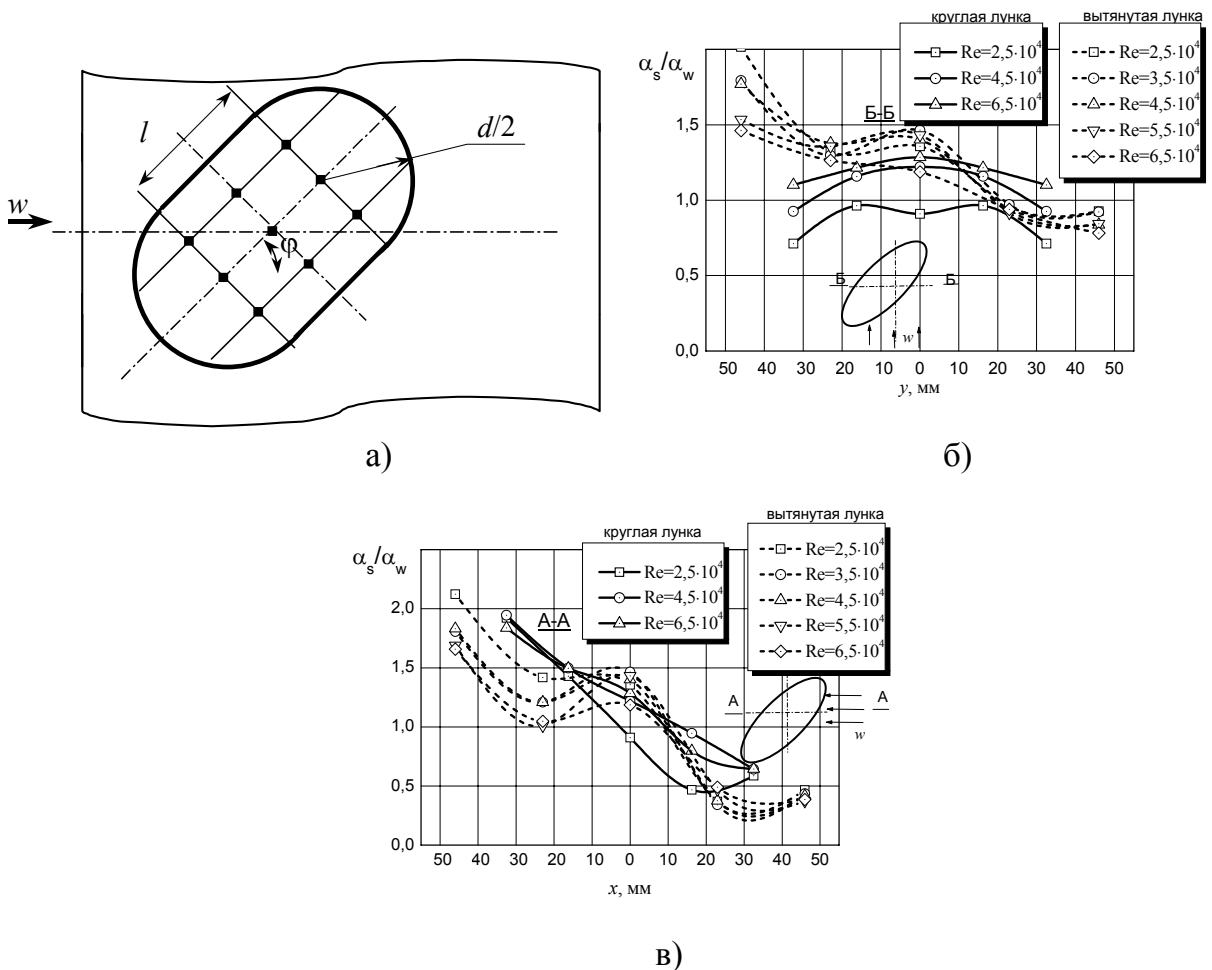


Рис. 20. Форма вытянутой лунки (а), относительные местные коэффициенты теплоотдачи в продольном (б) и поперечном (в) сечениях.

Здесь же нанесены данные для сферической лунки той же относительной глубины. На рис. 20, б, в видно, что симметрии в коэффициентах теплообмена не наблюдается ни в продольном, ни в поперечном направлениях, что подтверждает данные численного моделирования. Для полноты картина мы выполнили опыты на «предельном» варианте – поперечной цилиндрической каверне; результаты представлены на рис. 21.

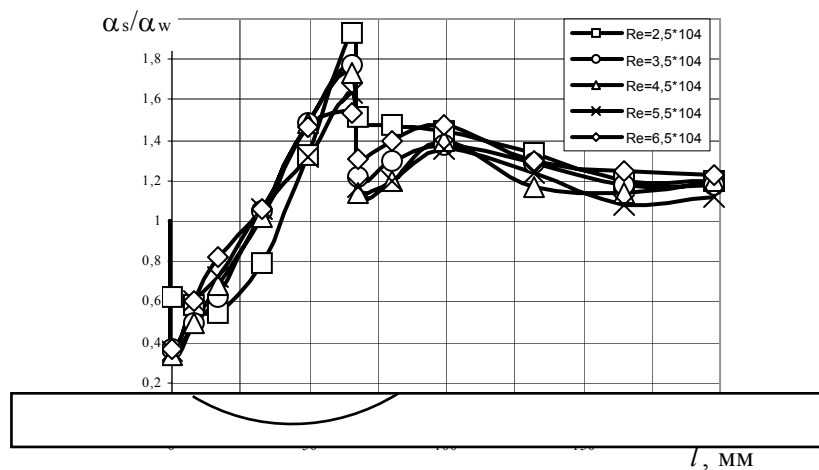


Рис.21. Относительные коэффициенты теплоотдачи в траншее и в ее следе

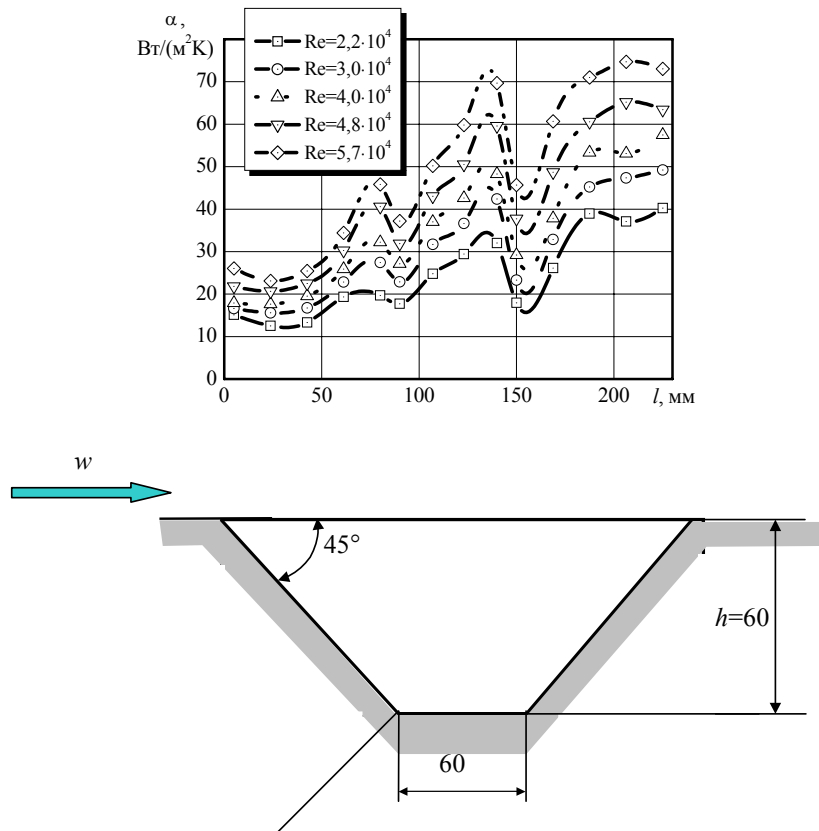


Рис. 22. Изменение местного коэффициента теплоотдачи в трапециевидной каверне

Видно, что на входе в траншею теплоотдача падает почти аналогично лунке. Затем, по мере приближения к задней кромке, возрастает до величин, в 2 раза превышающих теплоотдачу на пластине. На удалении в  $3d$  за траншеей отклонение коэффициента теплоотдачи от исходного составляет 10...25%; и, как показывает ход кривых, «шлейф» интенсифицированного теплообмена протянулся на  $5...10d$  и более.

Опыты проводились также в поперечной каверне трапециевидного сечения глубиной 60 мм (рис. 22). Конструкция рабочего участка и условия опытов были выбраны близкими к данным работ В.И. Терехова и др., где стенки обогревались электрическим током. Размеры, форму каверны и зону нагрева мы выбрали в точном соответствии с данными работы [110].

Сравнение с теплоотдачей на плоскости в наших опытах не проводилось, так как поток

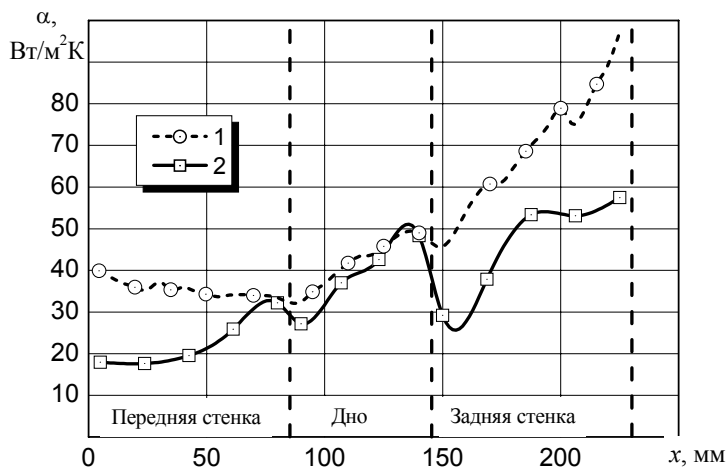


Рис. 23. Изменение коэффициента теплоотдачи на поверхности каверны: 1 – в наших опытах; 2 – по данным В.И. Терехова и др.

#### Свободно-конвективный теплообмен

Проведены исследования свободно-конвективного пограничного слоя, образующегося на вертикальной равномерно нагретой пластине. Эксперименты проводились на экспериментальном стенде кафедры «Гидроаэродинамика» СПбГПУ. Генератором свободноконвективного потока является вертикальная алюминиевая пластина шириной 90 см, высотой 4,95 м и толщиной 20 мм.

Целью экспериментов было сравнение результатов, полученных с помощью термоанемометрической аппаратуры, и с помощью ГДТП.

На рис. 24 изображены спектры пульсаций температуры (а) и теплового

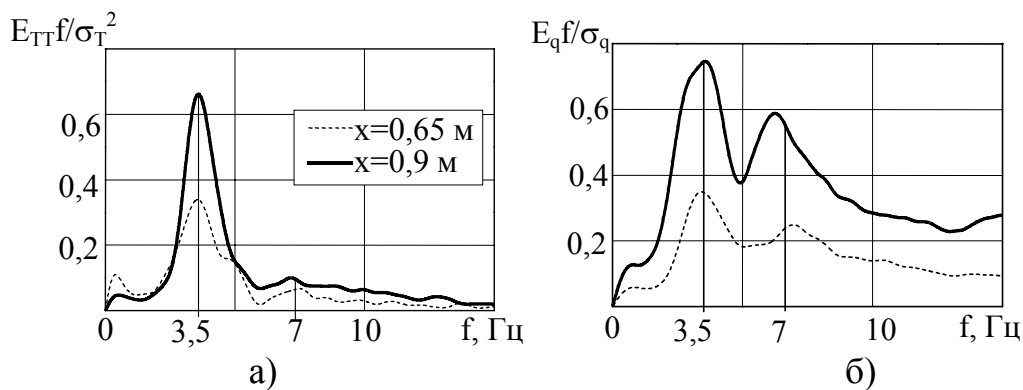


Рис.24. Спектр пульсаций температуры (а) и теплового потока (б) на удалении  $x$  от нижнего края пластины.

потока (б) в различных по высоте пластины сечениях пограничного слоя. Видно качественное соответствие результатов.

На рис.25 представлены зависимости максимальных по сечению интенсивностей турбулентных пульсаций температуры и пульсаций теплового потока от числа Грасгофа  $Gr_x$ . Распределения близки по форме, что косвенно подтверждает единую природу обоих процессов.

воздуха не имел «тепловой истории» перед каверной: паровой нагрев был сделан лишь для самого рабочего участка.

Сопоставление данных с результатами В.И. Терехова и др. (рис. 23) показало, что на дне каверны совпадение почти полное, а на стенках наблюдаются существенные отличия. Эти результаты требуют дальнейшего детального обсуждения.

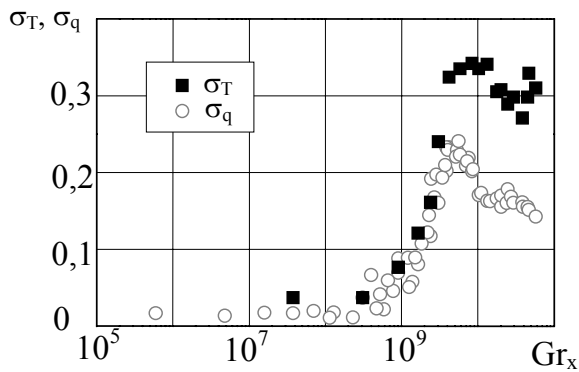


Рис.25. Интенсивность турбулентных пульсаций температуры и теплового потока.

теплообмена, насколько нам известно, до последнего времени не проводились: тепловой поток определяли расчетным путем. В случаях, когда теплообмен происходит в электрических и магнитных полях, тепловые потоки вообще не имеют расчетной оценки.

Измерения проводились на ударных трубах лаборатории газодинамики ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН и кафедры «Гидроаэродинамика» СПбГПУ. В опытах использовались ГДТП площадью  $4 \times 7 \text{ мм}^2$  и  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ , толщиной 0,2 мм, наклеенные на органическое стекло или на тефлон. Регистрация сигналов ГДТП проводилась запоминающими аналоговыми и цифровыми осциллографами типа С8-17 и фирмы «ТЕКТРОНИХ».

На ударной трубе ФТИ опыты проводили в атмосфере ксенона, нагреваемого ударной волной с числом Маха  $M=6 \dots 7$ . ГДТП располагали заподлицо с внутренней цилиндрической стенкой трубы в сечениях, отстоящих от закрытого торца на  $l = 100$  и  $425 \text{ мм}$ , ориентируя датчики меньшей стороной вдоль оси трубы.

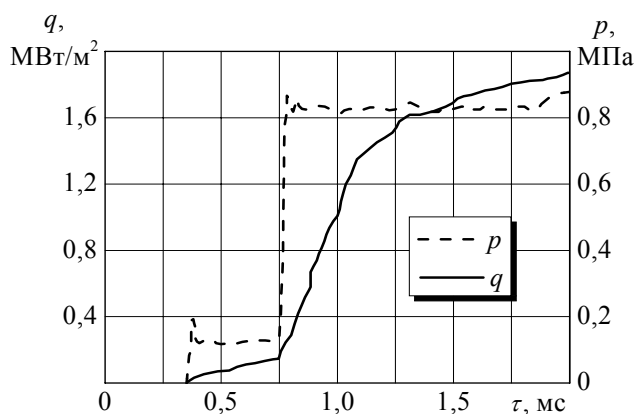


Рис. 26. Изменение плотности теплового потока и давления в ксеноне на стенке ударной трубы в сечении, отстоящем от ее торца на 100 мм

### Теплообмен в ударных трубах

Тепловые процессы в ударных трубах существенно нестационарны: характерное время имеет порядок  $10^{-3} \text{ с}$  и менее, а теплообмен в системе «газ – стенка» сложен по физической природе и изучен недостаточно.

В опытах традиционно принято измерять давление в полости трубы и температуру на стенке (цилиндрической и торцевой). Измерения тепловых потоков на поверхности

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

Данные измерений в сечении, отстоящем от торца трубы на 100 мм, представлены на рис. 26.

Ударная труба СПбГПУ имела глухой торец. Опыт проводили на воздухе при числе Ма-



ха  $M = 1,9$ ; ГДТП размещали на внутренней цилиндрической стенке трубы в сечениях, удаленных на 3 м, 98 и 40 мм от торца, а также в центре торцевой заглушки канала.

Представляют особый интерес опыты, в которых синхронно записаны изменения давления, плотности теплового потока и температуры (измеренной тонкопленочным платиновым термометром сопротивления) при многократном отражении ударной волны в 3 м от торца ударной трубы (рис.27).

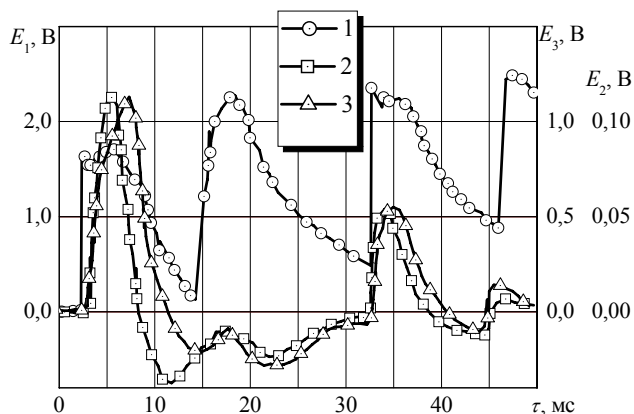


Рис. 27. Изменение сигналов датчиков давления (кривая 1), плотности теплового потока (кривая 2) и температуры (кривая 3) в ударной трубе с многократным отражением ударной волны

Следующую серию составили опыты на ударной трубе ФТИ (рис.28), в которых исследовалось влияние внешнего магнитного поля большой напряженности на сверхзвуковое течение плазмы в расширяющемся сопле. ГДТП 3 были установлены на клиновидной пластине, которая является продолжением стенки 4 сверхзвукового сопла. Камера со сверхзвуковым соплом была снабжена электромагнитами 6 для создания импульсного магнитного поля в момент прохождения потока по соплу.

Продолжительность этого процесса определяется длительностью стационарного истечения и составляет примерно 1 мс. В течение этого времени осуществляется магнитогазодинамическое (МГД) взаимодействие, изменяющее картину течения.

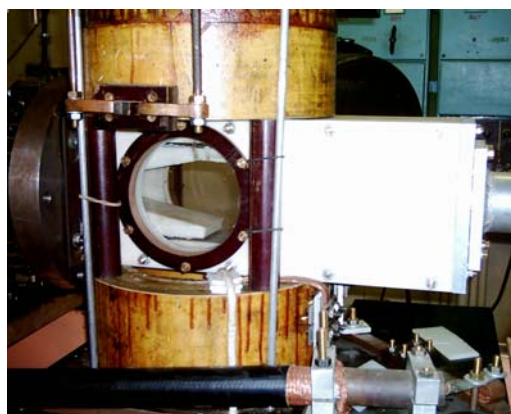
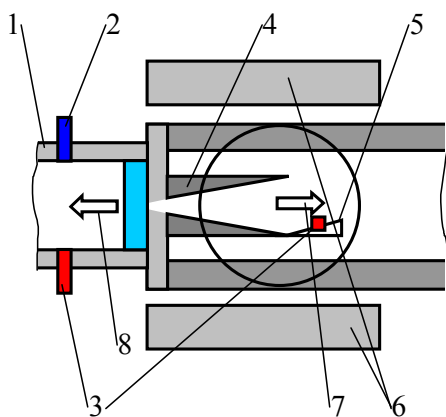


Рис. 28. Схема (а) и общий вид концевой части с соплом (б) ударной трубы ФТИ с внешним электромагнитным полем. Цифрами обозначены: 1 – ударная труба; 2 – датчик давления; 3 – вставки с ГДТП; 4 – сопло; 5 – клиновидная пластина; 6 – электромагниты; 7 – движение газа; 8 – отраженная ударная волна

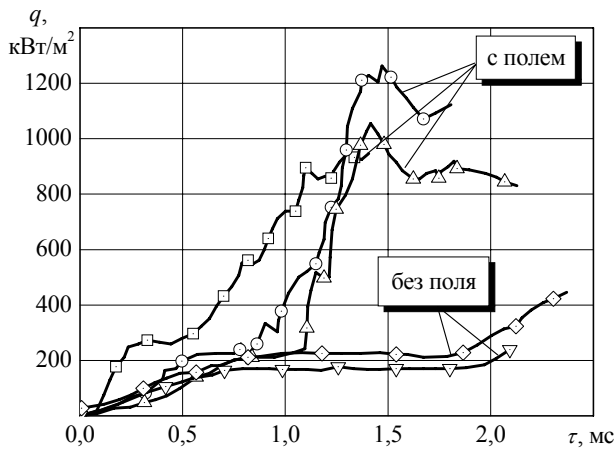


Рис. 29. Плотность теплового потока на стенке сопла в зависимости от наличия и напряженности магнитного поля

действием (ср. кривую при  $St = 0$ ). ГДТП, имеющий абсолютную градуировку, дает количественную информацию о теплообмене в этих (и других) условиях МГД взаимодействия.

Глава 4 описывает применение ГДТП в прикладных разработках: при

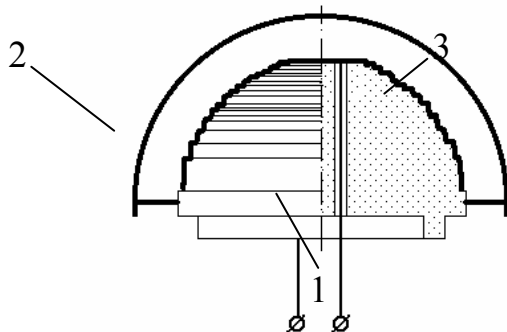


Рис.30. Конструкция чувствительного элемента

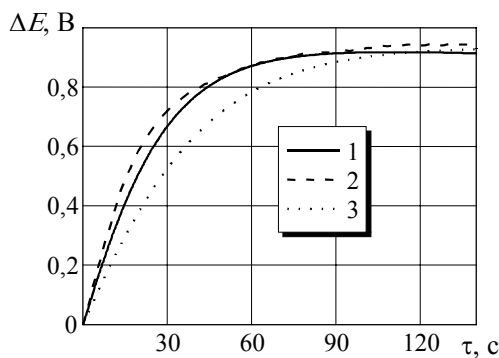


Рис. 31. Сопоставление экспериментальных и расчетных характеристик чувствительного элемента

На рис. 29 показаны сигналы датчика теплового потока при различной интенсивности МГД взаимодействия (на графике эта величина характеризуется безразмерным числом Стюарта  $St$ ).

Через 500 мкс для кривой, соответствующей  $St = 0,42$ , и через 1,1 мс для кривой, соответствующей  $St = 0,32$ , наблюдается резкий рост теплового потока. Мы это связываем с возникновением отрывного течения в сопле перед пластиной, инициированного МГД взаимодействием.

В рамках одной из наших разработок создан чувствительный элемент (ЧЭ) для регистрации облучения объекта достаточно мощным (около  $0,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) тепловым потоком. Прибор генерирует сигнал постоянного электрического тока в несколько вольт. Конструктивно ЧЭ состоит из полушара 1 с «террасами» на образующей, заполненными ГДТП 2<sup>1</sup> (рис.30). Телометрическая часть ЧЭ защищена экраном 3.

Разработана модель тепло-

<sup>1</sup> В разработке и изготовлении датчика принимал участие к. ф.-м. н. доц. Н.П. Дивин

вых процессов в системе «полушар-экран»; проведена серия численных экспериментов и натурные испытания ЧЭ.

Моделирование подтверждает экспериментальные данные (рис.31) и позволяет оптимизировать конструкцию ЧЭ путем численного эксперимента.

Проведено измерение плотности локального теплового потока в крышку блока цилиндров дизельного двигателя Indenor XL4D производства концерна PSA Peugeot Citroën.

В опытах применялся ГДТП 1 чувствительностью  $S_0=8,4\text{мВ/Вт}$  и размерами  $4\times 7\times 0,2\text{ мм}$ .

При сгорании топлива в цилиндре (рис.32) видны «два максимума» теплового потока: первый находится точно в ВМТ, второй – в  $70\dots 80^\circ$  после ВМТ, что характерно для дизелей с разделенными камерами сгорания. Экспериментального подтверждения «двойной максимум» до сих пор не имел –

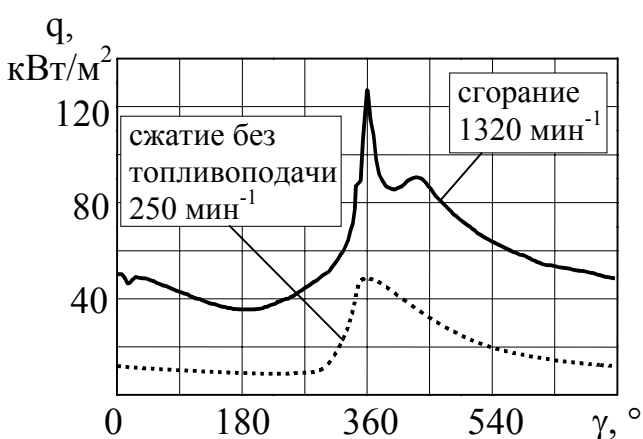


Рис.32. Зависимость плотности местного теплового потока от угла поворота коленчатого вала.

в первую очередь, из-за отсутствия датчиков теплового потока с достаточно малой инерционностью.

Датчик теплового потока в цилиндре дизельного двигателя показал свою работоспособность и пригодность к проведению нестационарной теплотометрии в ДВС.

Системы хранилищ делящихся материалов (ХДМ) должны быть недорогими в строительстве и эксплуатации, простыми и надежными. Поэтому важная роль в охлаждении их «начинки» принадлежит естествен-

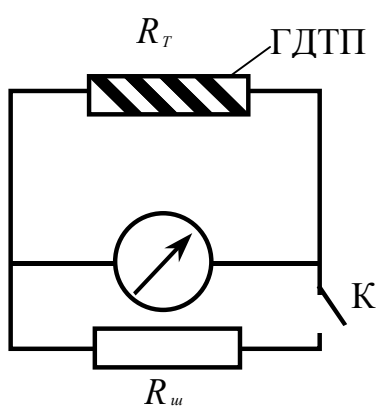
но-конвективному теплообмену – в первую очередь, в вертикальных трубах. Различное распределение загрузки требует рассматривать подогрев таких труб на различных участках, не исключено сочетание естественной и вынужденной конвекции и т.д.

В главе описан опыт применения ГДТП в полномасштабном эксперименте на базе ОАО НПО «ЦКТИ им. И.И. Ползунова» (г.Санкт-Петербург). В задачи эксперимента входило:

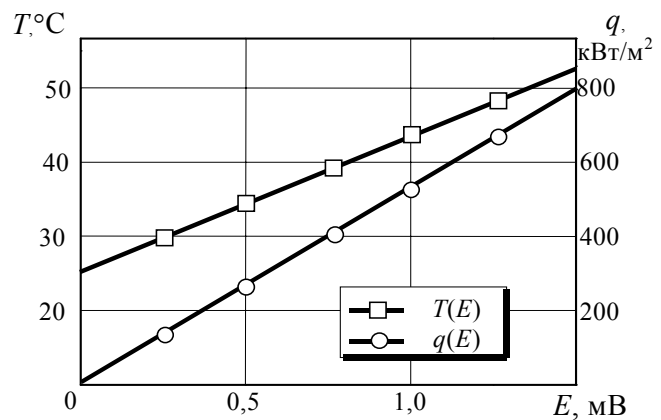
- измерить поля температуры и теплового потока на наружных и внутренних стенках трубы при различных схемах ее нагрева и охлаждения (постоянным тепловым потоком, средней постоянной температурой); при этом на различных участках трубы требовалось задавать различные условия теплообмена;
- измерить поля скоростей воздуха в трубе при естественной и смешанной конвекции;
- обработать данные опытов в виде уравнений подобия;
- сопоставить результаты с данными литературы, заполнить ниши в банках данных, связанных с ХДМ.

Глава 5 обобщает возможности и преимущества ГДТП и устройств на их основе при измерении температуры, расхода рабочего тела, касательных напряжений трения, теплофизических и радиационных характеристик, а также параметров электрических цепей.

Предложено использовать ГДТП как в качестве термометров сопротивления, так и для измерения температуры по «пассивной» схеме: в этом случае не требуется применять внешний источник, а температуру однозначно определяет термо-э.д.с. датчика и его омическое сопротивление (рис.33). Показано, как измерять тепловой поток и температуру на поверхности одним ГДТП и по одной паре проводов.



а)



б)

Рис. 33. Схема (а) и результаты градуировки (б) «пассивного» термометра с выходом на один канал регистрации

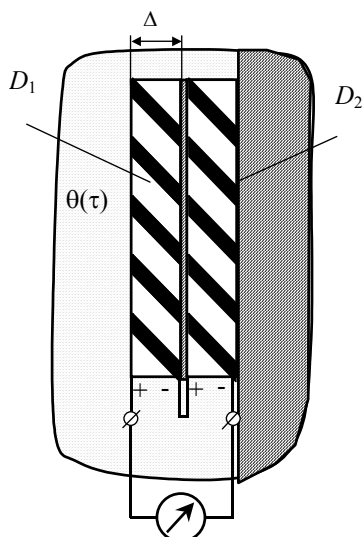


Рис. 34. Схема нестационарной термометрии с применением ГДТП

ГДТП дают новые возможности для термометрии в среде жидкости или газа с быстроменяющейся температурой. Схема термометрии в пояснениях не нуждается; расчетная схема измерения сводится к формуле

$$\theta(\tau) = T(\tau) + \tau_{\min} \cdot \frac{E_2 - E_1}{\rho c F \Delta S_0},$$

где  $\theta(\tau)$  - текущая температуры среды, омывающей датчик  $D_1$ ;  $T(\tau)$  - показания датчика  $D_1$ , включаемого как «пассивный» термометр по схеме 33,а;  $E_2 - E_1$  - разность термо-э.д.с. ГДТП  $D_1$  и  $D_2$ , фиксируемая прибором;  $\rho c$  - эффективная объемная теплоемкость «материала» ГДТП;  $F$  - площадь датчиков в плане;  $\Delta$  - толщина каждого из ГДТП;  $S_0$  - средняя вольт-ваттная

чувствительность ГДТП.

Использование ГДТП позволило создать корреляционный расходомер, действующий по методу тепловой метки (рис. 35,а).

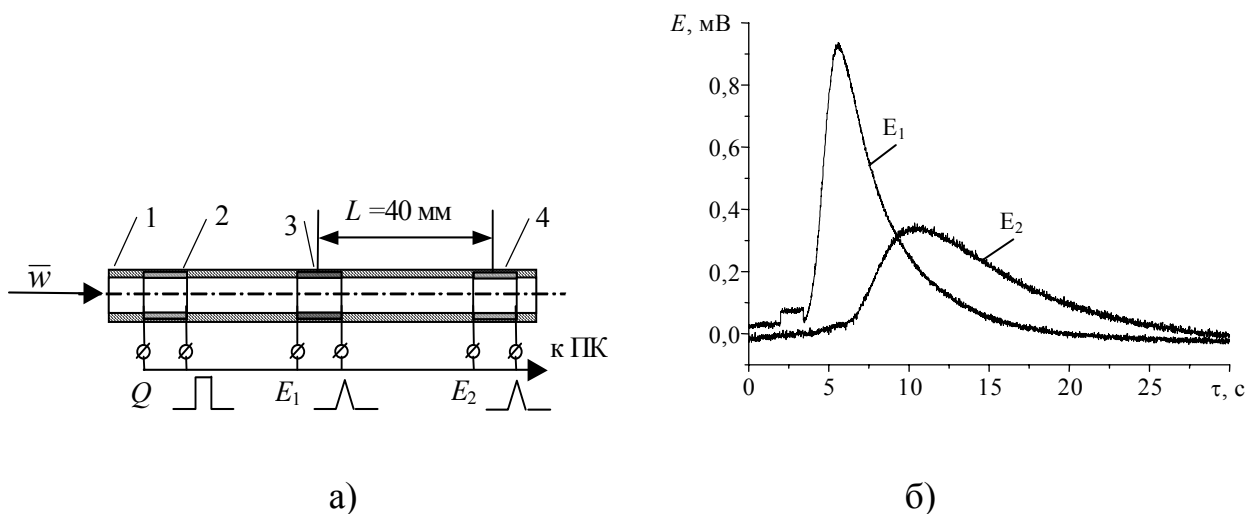


Рис. 35. Корреляционный расходомер на основе ГДТП (а) и типичные корреляционные кривые (б). Цифрами обозначены: 1 – трубка расходомера; 2 – нагреватель; 3, 4 – ГДТП.  $E_1$  и  $E_2$  – сигналы ГДТП 3 и 4, соответственно

Тепловая метка (область жидкости с более высокой температурой) приводит к появлению в цепи ГДТП сигналов  $E_1$  и  $E_2$ . Корреляционная обработка этих сигналов (резко отличных по форме) с помощью быстрого преобразования Фурье позволяет оценить их сдвиг по времени, а затем определить объемную скорость движущейся среды. Для воды при температуре  $+16^\circ\text{C}$  в диапазоне скоростей  $0,7 \dots 3,5$  м/с получим зависимость

$$\dot{V} = 8,062 \cdot \exp\left(-\frac{\tau_{\text{П}}}{0,531}\right),$$

где  $\dot{V}$  - объемный расход воды,  $\text{см}^3/\text{с}$ ;  $\tau_{\text{П}}$  – время прохождения тепловой метки, с. В отличие от расходомеров на термисторах, в данной конструкции точность измерения не убывает, а возрастает по мере уменьшения расхода: удалось сделать «счетчик капель». В более грубом, не требующем тарировки и компьютерной обработки сигналов, варианте прибор действует как двухсигнальное реле потока.

В случаях, когда в течении соблюдается аналогия Рейнольдса, с помощью ГДТП удастся измерить касательные напряжения трения (КНТ). Схема датчика КНТ представлена на рис. 36. Датчик установлен заподлицо с омываемой потоком поверхностью 4; нагреватель 1 электрически изолированный прокладкой 2 от ГДТП 3, обеспечивает малый (на доли градусов) перегрев открытой поверхности ГДТП относительно потока. Таким образом, «течение в целом» является изотермическим.

Для градуировки датчика КНТ мы реализовали вращательное движение Куэтта (рис. 36,б), где по частоте вращения  $\omega$  внутреннего цилиндра радиусом  $r_0$  и зазору между коаксиальными цилиндрами  $\Delta$  определяем КНТ

$$\tau_w = \mu \frac{\omega r_0}{\Delta}$$

(Здесь  $\mu$  – динамическая вязкость среды).

Для градуировки достаточно измерить сигнал ГДТП при двух значениях  $\omega$ . В работе предложен ряд типовых моделей, позволяющих создавать датчики КНТ различных конструкций.

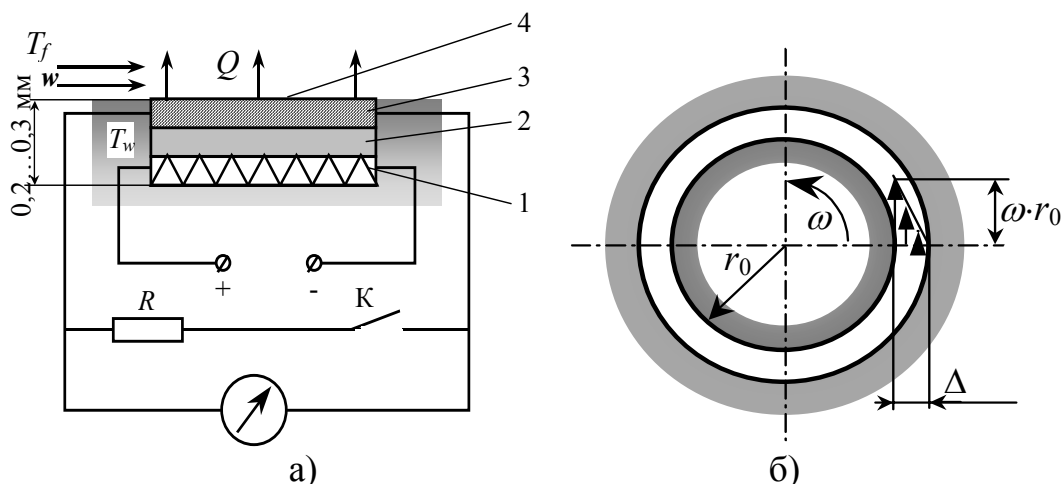


Рис. 36. Датчик КНТ с дополнительным нагревателем: а – конструкция; б – схема градуировки). Цифрами обозначены: 1 – плоский нагреватель; 2 – теплоизоляционная прокладка; 3 – ГДТП; 4 – поверхность, обтекаемая потоком

Представлены расчетные схемы для определения теплофизических характеристик тепловыделяющих и сыпучих материалов, основанные на использовании ГДТП и не требующие термометрии. Впервые реализована схема определения теплофизических характеристик, реализующая схему Э. Шмидта, и не требующая строго поддержания граничных условий: достаточно соблюдения одномерности задачи.

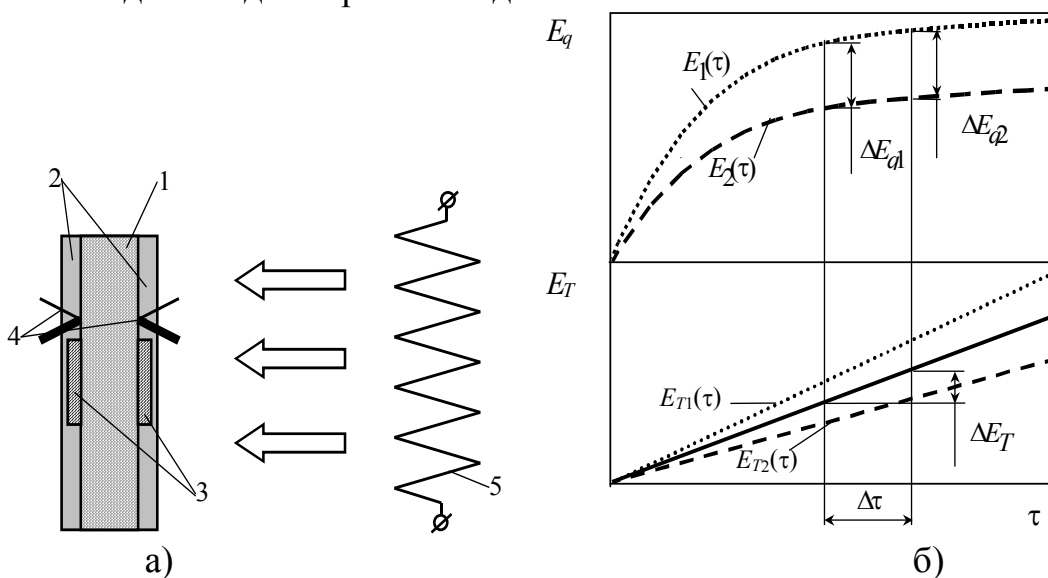


Рис. 37. Определение теплофизических характеристик на основе схемы Шмидта: а – схема опыта; б – кривые, подлежащие обработке. Цифрами обозначены: 1 – исследуемый образец; 2 – стальные пластины; 3 – ГДТП; 4 – термопары; 5 – излучатель

Конструкция излучательной ячейки ясна из рис. 37,а. Образец 1 помещен между пластинами 2, на каждой из которых заделан ГДТП 3 и термопара 4 (от термопар, вообще говоря, можно отказаться, используя «пассивную»

термометрию). Нагреватель 5 обеспечивает несимметричный нагрев всей сборки. В опыте фиксируются динамические характеристики ГДТП  $E_q$  и термопар  $E_T$ , после чего теплопроводность материала  $\lambda$  определяют как

$$\lambda = \frac{E_q \Delta x \cdot k_e}{S_0 F \Delta E_T},$$

где  $\Delta E_T$  - разность сигналов термопар чувствительностью  $k_e$ ;  $\Delta x$  - толщина слоя материала.

Степень черноты поверхности 1 можно оценить бесконечным способом, располагая массивный зонд 3 с ГДТП 2 на задней поверхности на малом удалении от исследуемой поверхности (рис. 38). Степень черноты поверхности

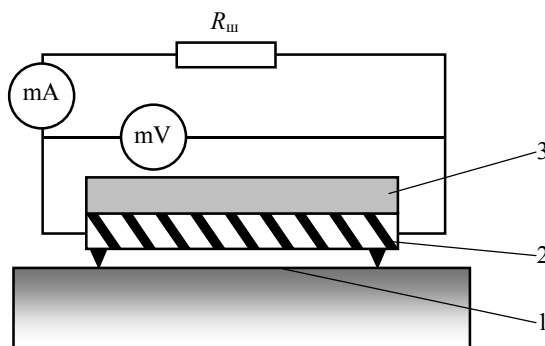


Рис. 38. Схема опыта по определению степени черноты поверхности: 1 – исследуемая поверхность; 2 – ГДТП; 3 – массивный зонд

$$\varepsilon = \frac{q(\tau_1) - q(\tau_2)}{C_0 \left\{ \left[ \frac{T(\tau_1)}{100} \right]^4 - \left[ \frac{T(\tau_2)}{100} \right]^4 \right\}},$$

где  $C_0$  – коэффициент поглощения абсолютно черного тела;  $q(\tau_1)$ ,  $q(\tau_2)$  - значения плотности теплового потока в произвольные моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$ ;  $T(\tau_1)$ ,  $T(\tau_2)$  - абсолютные температуры ГДТП в те же моменты времени.

Выявлены также возможности ГДТП как элемента системы для учета потребления электроэнергии, исключая несанкционированное воздействие. Фазовый провод на «мерном участке» должен быть покрыт или окружен ДТП, фиксирующими меняющиеся во времени значения джоуль-ленцева теплового потока (для последующей обработки в индивидуальном счетчике, архивирования, оплаты и т.д.). Такую систему «обмануть» крайне сложно: любое значение тока в проводнике вызовет сигнал ГДТП, причем условия теплообмена, температура воздуха и т.п. факторы влиять на уровень этих сигналов практически не будут.

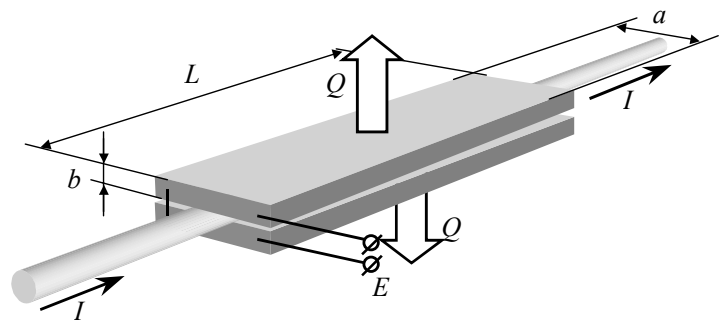


Рис.39. Проводник с ГДТП для контроля джоуль-ленцевых потерь

Схема датчика джоуль-ленцевых потерь представлена на рис. 39. Расплющенный участок проводника с током  $I$  имеет размеры  $a \times L$ ; с обеих сто-

рон они закрыты ГДТП толщиной  $b$ , соединенными последовательно. Сигнал  $E$  прямо пропорционален тепловому потоку  $Q$  и может быть использован для участка потребленной активной мощности.

В работе оценивается эффективность такой схемы по физическим, экономическим и метрологическим ограничениям. Показано, что уровень быстрой реакции ГДТП позволяет вести мониторинг в цепях переменного тока: определить частоту, коэффициент мощности и другие параметры, а также создавать иерархию устройств для учета энергопотребления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Установлены особенности, возможности и место в существующей номенклатуре измерительных средств для градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) на основе анизотропных монокристаллов висмута.
2. Определены связи между характеристиками ГДТП, плотностью измеряемого теплового потока и возможностями современных цифровых технологий.
3. Показано, что постоянная времени ГДТП не зависит от их толщины и определяется процессами в поверхностном слое анизотропной среды. Установлено, что значение постоянной времени ГДТП не превышает  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  с.
4. Подтверждены экспериментально возможности ГДТП в исследовании процессов конвективного теплообмена. Показано, что ГДТП позволяют измерять частотные характеристики нестационарного теплообмена. С их помощью удастся подобрать в ходе экспериментов рациональное расположение турбулизаторов, например, на поперечно-обтекаемом цилиндре.
5. Исследованы параметры местного теплообмена на поверхности и в окрестностях сферической и асимметричной лунки, цилиндрической и трапециевидной каверны. Выполнено сопоставление результатов с данными численного моделирования.
6. Исследована теплоотдача при свободно-конвективном движении жидкости вдоль протяженных вертикальных пластин. Установлены корреляции данных теплотрии и термометрии.
7. Измерена плотность теплового потока на внутренних поверхностях ударных труб, работающих на воздухе и на ксеноне. Установлено различие в механизме теплообмена на цилиндрической и торцевой поверхности ударной трубы. Показано, что воздействие внешнего магнитного импульса напряженностью около 1 Тл не влияет на показания ГДТП.
8. Разработан чувствительный элемент, в котором ГДТП выступают в качестве индикаторов облучения и формируют электрический сигнал, не требующий дальнейшего усиления. Предложена модель, позволяющая конструировать чувствительные элементы этого типа для различных условий эксплуатации.
9. Установлена зависимость местного теплового потока на поверхности



камеры сгорания дизельного двигателя от угла поворота коленчатого вала как в режиме прокрутки, так и с топливоподачей. При работе на вихрекамерном двигателе выявлен «двойной максимум» теплового потока вблизи верхней мертвой точки.

10. Накоплен опыт использования ГДТП в крупномасштабном эксперименте, связанном с изучением теплообмена в хранилище делящихся материалов.

11. Предложено использовать ГДТП для измерения температуры – как в традиционном варианте термометра сопротивления, так и по «пассивной схеме», исключая потребность во внешнем источнике электрического тока.

12. Создан, отградуирован и использован в эксперименте датчик касательных напряжений трения на основе ГДТП. Показана возможность применения датчика при изучении изотермических течений.

13. Разработано, создано и исследовано устройство для корреляционного измерения расхода методом тепловой метки, в котором применение ГДТП обеспечило измерение малых – вплоть до капельных – расходов. Создан новый индикатор движения жидкости.

14. Предложено использовать ГДТП для определения теплофизических характеристик материалов в рамках традиционного подхода. Испытан новый метод исследования теплофизических характеристик, не требующий точного поддержания граничных условий. Показано, как бесконтактно измерять степень черноты поверхности с помощью ГДТП, установленного на зонде.

15. Обоснованы возможности джоуль-ленцевой схемы измерения мощности в электрических цепях. Предлагаемый подход исключает несанкционированное вмешательство в учет энергии, обеспечивает мониторинг одновременно нескольких параметров электрических цепей переменного тока.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Измерение теплового потока на внутренних стенках канала ударной трубы/ Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. и др. /Письма в ЖТФ, 2004, вып. 2. С.76-80.

2. Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке/ Исаев С.А., Леонтьев А.И., Пышный И.А., Митяков В.Ю. и др.// Инженерно-физический журнал, 2003. Том 76, №2. С. 31-34.

3. Исаев С.А., Леонтьев А.И., Митяков А.В., Митяков В.Ю., Сапожников С.З. Местные Коэффициенты теплоотдачи на поверхности вытянутой лунки // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Т.6. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 2002. С.214 – 218.

4. Митяков А.В., Митяков В.Ю., Сапожников С.З.. Градиентные датчики теплового потока в корреляционной расходомерии// XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. Т.1, М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 417-420.

5. Митяков В.Ю., Митяков А.В., Сапожников С.З. Изучение радиационно-

конвективных тепловых потоков с помощью градиентных датчиков// Вторая Российская Национальная конф. по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 1998. Т. 6. С. 331-334.

6. Митяков В.Ю., Митяков А.В., Сапожников С.З. Определение радиационных и теплофизических характеристик материалов методами градиентной теплотометрии: Тр. XXVI Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск. 2002.

7. Митяков В.Ю., Митяков А.В., Сапожников С.З., Чумаков Ю.С. Использование поперечного эффекта Зеебека для измерения мгновенного значения теплового потока на вертикальной нагретой поверхности в условиях свободно-конвективного теплообмена // ТВТ. 2002. Т40. №4. С. 669 – 674.

8. Митяков В.Ю., Митяков А.В., Сапожников С.З.. Использование градиентных датчиков теплового потока для исследования местной теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра// XII Школа-семинар молодых ученых и специалистов. Т. 1, М.: Изд-во МЭИ, 1999. С. 47-50.

9. Сапожников С.З., Митяков А.В., Митяков В.Ю. Возможности градиентных датчиков при измерении тепловых потоков, температур касательных напряжений трения: Тр. XXVI Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск, 2002.

10. Сапожников С.З., Митяков А.В., Митяков В.Ю. Математическая модель и экспериментальное исследование датчика излучения в оптическом диапазоне длин волн// Наука Кубани. Проблемы физико-математического моделирования. Естественные и технические науки. – 1998. №2. С. 17-21.

11. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. /Градиентные датчики теплового потока: СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 169 с.

12. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Возможности градиентной теплотометрии при изучении локального теплообмена в камерах сгорания ДВС/ Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Т.1. Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен. М.: МЭИ, 2002. С.214 – 218.

13. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Локальный теплообмен при вынужденной конвекции в сферической лунке. IV Минский международный форум по тепломассообмену. Минск, 2000.С.479-482.

14. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Теплотометрия в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с использованием градиентных датчиков теплового потока // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика, 1997. №9-10. С. 53-57.

15. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Теплотометрия в энергетике и экологии: использование градиентных датчиков// Тез. Докл. Науч.-техн. конф.: Фундаментальные исследования в технических университетах. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 192.

16. Физическое и численное моделирование вихревого теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на плоскости// Баранов П.А., Исаев С.А., Леонтьев А.И., Митяков В.Ю. и др. Теплофизика и аэромеханика, 2002, том 9, № 4. С. 521-532.

17. Mitiakov V., Sapozhnikov S., Mitiakov A. Local heat transfer in the spherical cavity at the forced convection // 3-rd European Thermal Sciences Conference

- 2000, Heidelberg, Germany, 2000, vol.2, p. 671-674.
18. Mitiakov V., Sapozhnikov S., Mitiakov A. Transient phenomena in gradient heat flux sensors // 3-rd European Thermal Sciences Conference 2000, Heidelberg, Germany, 2000, vol.2, p. 687-690.
19. Mitiakov V.Y., Sapozhnikov S.Z., Chumakov Y.S. and Mitiakov A.V. Experimental investigation of the convective heat transfer using gradient heat flux sensors // 5<sup>th</sup> World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Thessaloniki, Greece. 2001. P.111-116.
20. Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Y., Mitiakov A.V. Capabilities of Gradient Sensors in the measurement of the Heat Fluxes, Temperatures, Tangential Stresses, and Thermophysical characteristics of materials /Journal of Engineering Thermophysics, 2003, Vol. 12, No. 1. P. 49 – 71.
21. Sapozhnikov S.Z., Mitiakov V.Y., Mitiakov A.V. Heat flux sensor for heat transfer investigation// 11-th International Heat Transfer Conference. Kyongju, Korea, 1998. Vol.4, P. 77-79.
22. Universal sensor for measuring shear stress, mass flow or velocity of a fluid or gas, for determining a number of drops, or detecting drip or leakage. Divin N.P., Mitiakov V.Yu., Sapozhnikov S.Z., Mitiakov A.V. Patent number EP1223411. Publication date 2002-07-17.
23. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в теплофизическом эксперименте// ТВТ. 2004. Т42. №3. С. 1 – 9.
24. Сапожников С.З., Митяков А.В., Митяков В.Ю. Динамические характеристики ГДТП: Тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск, 2004.
25. Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Митяков В.Ю. и др. Применение градиентного датчика теплового потока в экспериментах на ударной трубе: Тр. Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений». Москва, 2004.
26. Бобашев С.В., Менде Н.П., Сахаров В.А., Митяков В.Ю. и др. Возможности градиентных датчиков при исследовании процессов в ударных трубах: Тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. Новосибирск, 2004.
27. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута// ЖТФ. 2004. Т.74. №7. С. 114 –120.
28. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентная теплотметрия в теплотехническом эксперименте// Труды СПбГПУ № 491. 2004. С.34 – 47.
29. Application of Gradient Heat Flux Sensor in Shock Tube Experiments. Bobashev, S.V., Mende, N.P., Sakharov V.A., Mitiakov V.Y. 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 10 – 13 Jan 2005. Reno, Nevada.