

На правах рукописи



*Митяков Андрей Владимирович*

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ  
В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Специальность 05.14.04 – «Промышленная теплоэнергетика»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена на кафедре «Теоретические основы теплотехники» государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный консультант: доктор техн. наук, профессор  
*Сапожников Сергей Захарович*

Официальные оппоненты: доктор техн. наук, профессор  
*Рундыгин Юрий Александрович*

доктор техн. наук, ст. науч. сотр.  
*Зейгарник Юрий Альбертович*

доктор техн. наук, профессор  
*Свиридов Валентин Георгиевич*

Ведущая организация: *Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», г. Санкт-Петербург*

Защита состоится «06» апреля 2010 г. в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «02» марта 2010 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью учреждения, в двух экземплярах просим направлять по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ГОУ «СПбГПУ», на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 5526552  
e-mail: kg1210@mail.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета



*Григорьев К. А.*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Совершенствование конструкций, оптимизация схемных решений и режимов, сокращение энергопотребления, защита окружающей среды при действии теплоэнергетических установок требует комплексных теоретических и экспериментальных исследований процессов теплообмена на стадиях разработки, испытаний, эксплуатации и модернизации энергетического оборудования.

Современный теплотехнический эксперимент – лабораторный и промышленный – резко повысил информативность. В первую очередь, это связано с возможностями цифровой измерительной техники и компьютеризацией опытов, позволяющими регистрировать, архивировать и обрабатывать большие массивы данных. В то же время датчики существенно отстают от уровня преобразовательной техники и в настоящее время сдерживают развитие экспериментальных исследований. Сходные трудности, но на гораздо более высоком уровне, проявляются при эксплуатации теплоэнергетических установок, когда измерения технологических параметров являются входными сигналами для систем управления.

Диссертация посвящена одному из узких мест в эксперименте – определению тепловых потоков (теплометрии) на поверхностях теплообмена. Если в лабораторных условиях теплометрия представляет лишь методические и аппаратные трудности, то в экспериментах промышленных к ним добавляются требования высокой надежности датчиков и аппаратуры в течение длительного времени, сложность или невозможность доступа к датчикам во время эксплуатации энергоустановки, ограничение числа каналов для вывода информации и др.

Актуальность темы подтверждается поддержкой, оказанной работе Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ). Основные результаты получены в ходе выполнения проектов 02-02-17562-а, 02-02-81035-Бел2002\_а, 03-02-06906-мас, 04-02-16944-а, 04-02-81005-Бел2004\_а, 05-02-08128-офи\_а, 05-02-16071-а, 05-02-16184-а, 05-08-33486-а, 06-08-00777-а, 06-08-03049-б, 07-08-00635-а, 08-08-00414-а, 08-08-00802-а и 08-08-12205-офи, МНТЦ 3475р, а также проекта «Энергосберегающие технологии» Инновационной образовательной программы ГОУ «СПбГПУ».

### **Цели исследования.**

1. Разработать с единых методических позиций систему расчетов, позволяющих создавать и применять градиентные датчики теплового потока (ГДТП) в лабораторном и промышленном теплотехническом эксперименте.
2. Создать и исследовать ГДТП из монокристаллов и искусственных слоистых сред, определить их рабочие характеристики, область применения и оценить многофункциональность.
3. Изучить динамические характеристики ГДТП, использовать их быстродействие в ходе тестовых и приоритетных исследований теплообмена в существенно нестационарных условиях.
4. Тестировать ГДТП и приборы на их основе путем исследования конвектив-

ного, радиационного и сложного теплообмена применительно к решению задач промышленной теплоэнергетики.

5. Разработать методику, создать измерительные ячейки и выполнить теплометрию с использованием гетерогенных ГДТП на теплообменных поверхностях промышленных котельных агрегатов в условиях эксплуатации.

#### **Научная новизна.**

1. Создана физическая модель, адекватно описывающая действие ГДТП различных типов. Дана оценка толщины «рабочего» слоя, генерирующего термоЭДС, сопоставлены условия и результаты теплометрии, выполненной датчиками продольного и поперечного типов.

2. Впервые получены слоистые композиты на основе металлов, сплавов и полупроводников, являющиеся заготовками для ГДТП. Осуществлена диффузионная сварка пакетов из чередующихся пластин при отсутствии защитных сред. Установлено, что ширина диффузионной зоны на границе слоев не превышает 5% их толщины.

3. Показано, что постоянная времени ГДТП слабо зависит от их типа, материалов и конструкции, а сами датчики адекватно реагируют на существенно нестационарные тепловые воздействия и свободны от влияния электромагнитных полей.

#### **Практическая ценность.**

1. Разработаны, созданы, отградуированы и протестированы в ходе лабораторных и промышленных экспериментов ГДТП различных видов, размеров и конструкций. Установлено, что их технические характеристики существенно превышают уровень современных мировых аналогов.

2. Установлены соотношения между ожидаемым уровнем теплового потока, размерами ГДТП и возможностями аппаратуры, позволяющие выбирать любой из трех факторов по двум другим, протестирована и успешно использована система для обработки сигналов ГДТП, их архивирования и преобразования.

3. Созданы макеты и опытные образцы устройств, использующие ГДТП для измерения температуры, расхода, касательных напряжений трения и параметров в электрических сетях.

4. Создан опытный образец чувствительного элемента, регистрирующий поток излучения без дополнительного усиления сигнала.

5. ГДТП использованы как средство количественной диагностики тепловых потерь на промышленных и энергетических объектах.

6. Реализована в промышленных условиях градиентная теплометрия в топке котла БКЗ-210-140ф, показавшая работоспособность и информативность ГДТП, а также их полезность при диагностике шлакования поверхностей теплообмена.

**Внедрение.** Результаты работы использованы в учебном процессе ГОУ «СПбГПУ» и «СПбГУ ИТМО» (г. Санкт-Петербург), в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), на ТЭЦ-4 (г. Киров), филиале ОАО «Силовые машины» – «Электросила» и ЗАО «Стрелец СПб-Б» (г. Санкт-Петербург).

**Достоверность результатов** подтверждается их совпадением (в тестовых

экспериментах) с надежными данными других источников, использованием при построении физических моделей фундаментальных краевых задач теплопроводности, апробированных уравнений подобия и экспериментальных данных других авторов, использованием экспериментальной техники последнего поколения с подтвержденными метрологическими характеристиками, привлечением к экспертизе свойств ГДТП широкого круга специалистов.

**Личный вклад автора.** Все основные результаты работы получены под руководством и при участии автора. Диссертанту принадлежат: постановка задачи, создание физической модели для описания характеристик ГДТП, разработка, создание, градуировка и испытание гетерогенных ГДТП, основные результаты, полученные при тестировании ГДТП и в ходе градиентной теплотометрии. Он активно участвовал в создании теплотометрических ячеек для исследования теплообмена в котельном агрегате, а также в проведении и обсуждении результатов промышленных экспериментов. Часть опытов и расчетов выполнены совместно с членами исследовательской группы на кафедре «Теоретические основы теплотехники» ГОУ «СПбГПУ», а также со специалистами других подразделений университета и организаций, чье участие отмечено в тексте диссертации.

**Автор защищает:**

1. Основы теории ГДТП, позволяющие с единых позиций описывать и сопоставлять действия сплошных и слоистых датчиков, выбирать материалы для их создания, а также конструктивные и технологические параметры, прогнозировать вольт-ваттную чувствительность.
2. Конструкцию, технологию производства, градуировки и монтажа гетерогенных датчиков теплового потока (ГГДТП), обеспечивающих выполнение высокотемпературной градиентной теплотометрии.
3. Использование ГДТП для измерений температуры, расхода, протекания жидкости, касательных напряжений трения и параметров электрических сетей.
4. Экспериментально установленный уровень постоянной времени ГДТП ( $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с) и возможность применения ГДТП в присутствии мощных электромагнитных воздействий.
5. Новую систему градиентной теплотометрии в топках котлоагрегатов, конструкцию измерительных ячеек на основе ГГДТП и результаты промышленного использования метода – в частности, как средства диагностики при шлаковании поверхностей теплообмена.

**Апробация работы**

Отдельные разделы и диссертация в целом докладывались и обсуждались на семинаре Петербургского отделения Международной Энергетической Академии и ядерного общества Санкт-Петербурга «Эффективные системы теплоснабжения в муниципальном и индивидуальном строительстве» (Санкт-Петербург, 1997); 11-й международной конференции по теплообмену (Кюнджу, Корея, 1998); 2–4 Российских национальных конференциях по тепломассообмену (Москва, 1998, 2002, 2006); 12–17 Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (1999

– 2009); научном семинаре под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физико-технические проблемы энергетики» (Москва, 1999); научном семинаре в ОАО НПО «ЦКТИ им. И.И. Ползунова» (Санкт-Петербург, 2000); 4-м и 6-м Минских международных форумах по теплообмену (Минск, 2000, 2008); 3-й европейской конференции по термическим исследованиям (Гейдельберг, Германия, 2000); 40-й научно-практической конференции «Крыловские чтения» (Санкт-Петербург, 2001); 5-й Международной конференции по экспериментальному теплообмену, механике жидкости и термодинамике (Салоники, Греция, 2001); 26–28 Сибирских теплофизических семинарах (Новосибирск, 2002–2009); научных семинарах кафедры «Теоретические основы теплотехники» ГОУ «СПбГПУ» (2000–2009); выездном семинаре Национального комитета РАН по теплообмену под руководством академика РАН А.И. Леонтьева по вопросам измерений в теплофизике (Санкт-Петербург, 2004); Международной конференции «Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений» (Москва, 2004); 43-м аэрокосмическом семинаре и выставке AIAA (Рено, США, 2005); 2-й и 3-й Российских конференциях «Теплообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Москва, 2005, 2008); Политехническом симпозиуме (Санкт-Петербург, 2006); 13-й международной конференции «Методы аэрофизических исследований (ICMAR)» (Новосибирск, 2007); Международной конференции «Двигатель-2007» (Москва, 2007); 5-й Балтийской конференции по теплообмену (Санкт-Петербург, 2008) и Международном молодежном форуме «Будущее высоких технологий и инноваций – за молодой Россией» (Санкт-Петербург, 2009).

Исследования автора получили поддержку и признание специалистов. Он награжден премией имени первого ректора Санкт-Петербургского политехнического института князя А.Г.Гагарина (1998), медалью Российского союза молодых ученых «За преданность науке» (2008), грамотой «За высокие достижения в научной и инновационной деятельности на благо Санкт-Петербургского государственного политехнического университета» (2008). Работы с участием А.В.Митякова признавались лучшими и получали награды на Школах-семинарах молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева (1999, 2009), международном молодежном форуме «Будущее высоких технологий и инноваций – за молодой Россией» (2009). Диссертант стал победителем конкурса грантов Президента Российской Федерации для молодых российских ученых (2008) и лауреатом премии правительства Санкт-Петербурга (2009).

**Публикации.** По материалам работы имеется 57 публикаций, в том числе 2 монографии и 1 патент Российской Федерации на полезную модель.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, указателя литературы из 201 ед. и 6 приложений. Она представлена на 284 с. текста и 39 с. приложений, имеет 170 рисунков и 7 таблиц.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, сформулированы научная новизна и практическая цен-

ность исследования, определен личный вклад автора.

**Глава 1** содержит постановку задачи и определяет область исследования: теплотрию на основе градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) типа вспомогательной стенки.

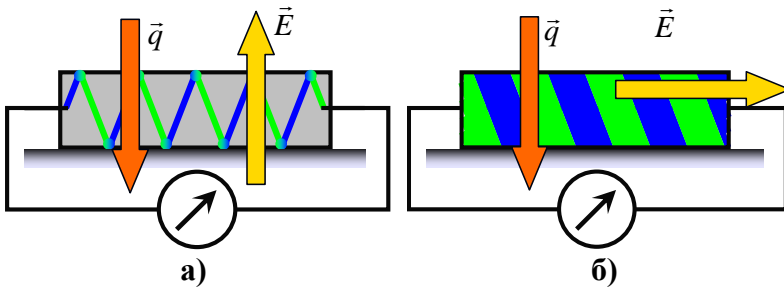


Рис. 1. ДТП продольного (а) и поперечного (б) типов

Выделены ДТП продольного и поперечного типов (рис. 1); в первом случае вектор плотности теплового потока  $\vec{q}$  и напряженности поля термоЭДС  $\vec{E}$  коллинеарны, во втором – нормальны.

Основу современного парка составляют именно ДТП продольного типа, при том, что основной их недостаток – снижение чувствительности при попытке увеличить быстродействие – принципиально неустраним.

На рис. 2 различные ДТП сопоставлены по вольт-ваттной чувствительности  $S_0$ , постоянной времени  $\tau_{\min}$  и рабочей температуре  $T$ ; здесь же нанесены характеристики ГДТП (включая гетерогенные), разработанных автором.

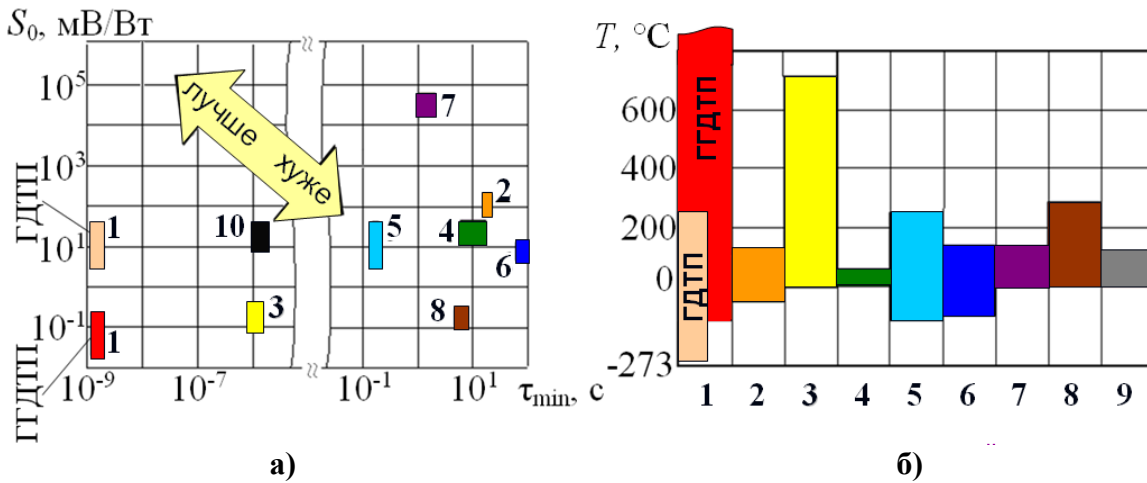


Рис. 2. Характеристики ДТП: по чувствительности и быстродействию (а), по температурному диапазону (б). Цифрами обозначены датчики фирм: 1 – ГДТП на основе висмута и ГГДТП, СПбГПУ (Россия); 2 – ИТТФ НАН Украины; 3 – «Vatell» (США); 4 – «Wuntronic» (ФРГ); 5 – «Captec» (Франция); 6 – «Hukseflux» (Нидерланды); 7 – лаборатории физической электроники (Швейцария); 8 – «Newport» (США); 9 – «TNO» (Нидерланды); 10 – ALTR «FORTECH HTS GmbH», (ФРГ)

Действие ГДТП основано на возникновении поперечной компоненты электрического поля в среде с анизотропными теплопроводностью, электропроводностью и коэффициентом термоЭДС при прохождении теплового потока в направлении, не совпадающем с главными осями анизотропной среды.

ГДТП обычно состоят из прямоугольных брусков – анизотропных термоэлементов (АТЭ), для повышения сигнала последовательно соединенных в батарею. Вольт-ваттная чувствительность АТЭ

$$S_0 = \frac{e_x}{q F} = \frac{(\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11}) \sin \theta \cos \theta}{b(\lambda_{33} \sin^2 \theta + \lambda_{11} \cos^2 \theta)}, \quad (1)$$

где  $e_x$  – термоЭДС, генерируемая АТЭ;  $q$  – плотность теплового потока на поверхности АТЭ;  $F$  – площадь АТЭ в плане;  $\varepsilon_{33}$ ,  $\varepsilon_{11}$ ,  $\lambda_{33}$ ,  $\lambda_{11}$  – соответственно, электро- и теплопроводность анизотропной среды в направлениях главных осей 33 и 11;  $\theta$  – угол, под которым АТЭ вырезан из монокристалла.

Оптимальное значение угла  $\theta_{\text{opt}}$  определяется из равенства

$$\theta_{\text{opt}} = \pm \arctg \sqrt{\frac{\lambda_{11}}{\lambda_{33}}}.$$

Термостойкость природных монокристаллов, пригодных для изготовления ГДТП, невысока, а перечень краток. Поэтому в работе развита теория слоистой среды (рис. 3), которая в пределе, при малых толщинах слоев  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , стремится к среде сплошной.

Эффективные значения кинетических коэффициентов в направлениях главных осей  $x_0$  и  $z_0$  имеют вид:

– для теплопроводности:

$$\lambda_{x_0} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \lambda_1 \left( \frac{1 + K_\delta}{1 + \frac{K_\delta}{K_\lambda}} \right), \quad (2)$$

$$\lambda_{z_0} = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\delta_1 \lambda_1 + \delta_2 \lambda_2} + \frac{\sigma_1 \sigma_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \delta_1 \delta_2}{\delta_1 \sigma_1 + \delta_2 \sigma_2} \cdot T} \approx \frac{\delta_1 \lambda_1 + \delta_2 \lambda_2}{\delta_1 + \delta_2} = \frac{\lambda_1 + K_\delta \lambda_2}{1 + K_\delta} = \lambda_1 \left( \frac{1 + K_\delta K_\lambda}{1 + K_\delta} \right), \quad (3)$$

– для коэффициентов термоЭДС:

$$\varepsilon_{x_0} = \frac{\frac{\varepsilon_1 \delta_1}{\sigma_1} + \frac{\varepsilon_2 \delta_2}{\sigma_2}}{\frac{\delta_1}{\sigma_1} + \frac{\delta_2}{\sigma_2}} = \frac{\varepsilon_1 + \frac{\varepsilon_2 K_\delta}{K_\sigma}}{1 + \frac{K_\delta}{K_\sigma}} = \varepsilon_1 \left( 1 + \frac{K_\varepsilon}{K_\sigma} K_\delta \right), \quad (4)$$

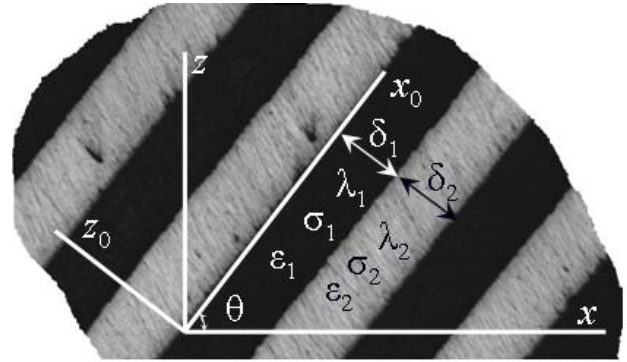


Рис. 3. Искусственно созданная слоистая анизотропная среда



$$\varepsilon_{z0} = \frac{\delta_1 \sigma_1 \varepsilon_1 + \delta_2 \sigma_2 \varepsilon_2}{\delta_1 \sigma_1 + \delta_2 \sigma_2} = \frac{\sigma_1 \varepsilon_1 + K_\delta \sigma_2 \varepsilon_2}{\sigma_1 + K_\delta \sigma_2} = \varepsilon_1 \left( \frac{1 + K_\varepsilon K_\sigma K_\delta}{1 + K_\sigma K_\delta} \right). \quad (5)$$

(Здесь  $\lambda_1, \lambda_2$  – теплопроводность слоёв;  $\sigma_1, \sigma_2$  – удельная электропроводность слоёв;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – коэффициенты термоЭДС слоёв;  $\delta_1, \delta_2$  – толщина слоёв;  $K_\lambda = \lambda_2/\lambda_1$ ;  $K_\sigma = \sigma_2/\sigma_1$ ;  $K_\varepsilon = \varepsilon_2/\varepsilon_1$ ;  $K_\delta = \delta_2/\delta_1$ ;  $T$  – среднее значение термодинамической температуры для рассматриваемой среды (величина  $Z = (\sigma_1 \sigma_2 (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \delta_1 \delta_2) / (\delta_1 \sigma_1 + \delta_2 \sigma_2)$  – добротность среды – для металлических материалов пренебрежимо мала).

Полагая в равенствах (1) – (5)  $\lambda_{x0} \equiv \lambda_{11}$ ,  $\lambda_{z0} \equiv \lambda_{33}$ ,  $\varepsilon_{x0} \equiv \varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{z0} \equiv \varepsilon_{33}$  определим значения  $S_0$  и  $\theta_{opt}$ , а также максимум вольт-ваттной чувствительности  $S_{0max} = S_0(\theta_{opt})$ , где

$$\theta_{opt} = \pm \arctg \frac{1 + K_\delta}{\sqrt{\left(1 + \frac{K_\delta}{K_\lambda}\right) (1 + K_\delta K_\lambda)}}. \quad (6)$$

Безразмерная вольт-ваттная чувствительность слоистого АТЭ

$$\Sigma_0 = \frac{S_0 b}{\varepsilon_1 \lambda_1} = \frac{\left( \frac{1 + K_\varepsilon K_\sigma K_\delta}{1 + K_\sigma K_\delta} - \frac{1 + \frac{K_\varepsilon}{K_\sigma} K_\delta}{1 + K_\sigma K_\delta} \right) \sin \theta \cos \theta}{\frac{1 + K_\lambda K_\delta}{1 + K_\delta} \sin^2 \theta + \frac{1 + K_\delta}{1 + \frac{K_\delta}{K_\lambda}} \cos^2 \theta}. \quad (7)$$

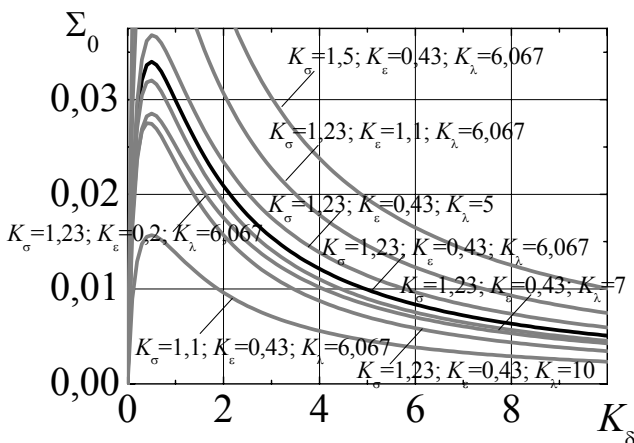


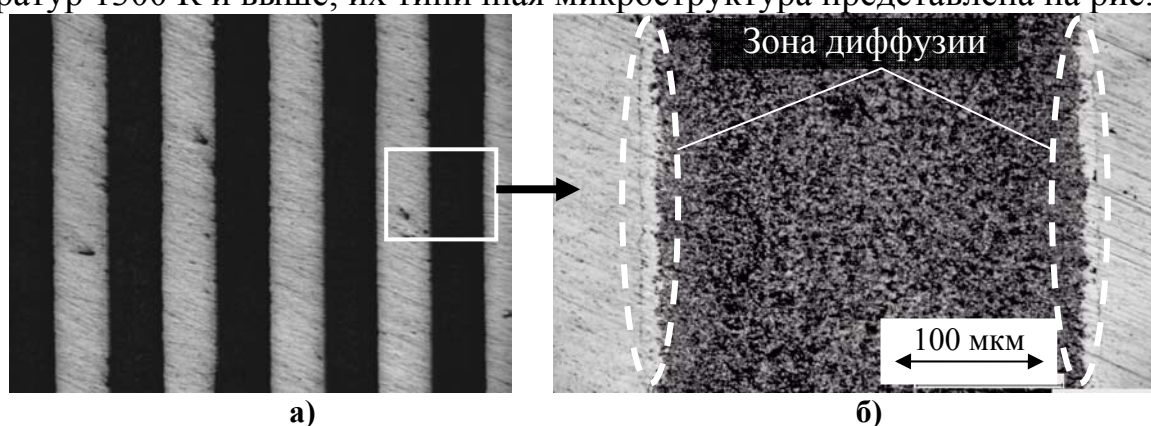
Рис.4. Безразмерная вольт-ваттная чувствительность слоистого АТЭ

Функция  $\Sigma_0 = (K_\delta)$  имеет экстремум; на рис. 4 показан ход кривых и выделен случай, когда  $K_\varepsilon = 0,43$ ,  $K_\lambda = 6,067$ ,  $K_\sigma = 1,23$  (композиция сталь 12X18Н9Т + никель). Это позволяет рассматривать все ГДТП – как монокристаллические, так и гетерогенные – в рамках одних и тех же расчетных формул.

В работе показана возможность создания ГДТП на основе слоистых композитов. Работы Л. Гайлинга, Т. Занера, Р.-М.Сюджей, Р.С. Дерберри и

Б.С. Манна, а также датчики ALTR и др. подтвердили правомерность подхода, но не позволили создать ГДТП, технологически и конструктивно пригодные для теплотехнического эксперимента.

В 2007 г. в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете с участием автора впервые созданы ГДТП на основе слоистых композитов. Наличие макронеоднородностей (гетерогенная структура) таких сред натолкнуло на мысль назвать их гетерогенными градиентными датчиками теплового потока (ГГДТП). Первым шагом стало создание ГГДТП на основе композиций сталь 12Х18Н9Т + никель, сталь 65Х13 + никель, хромель + алюмель и железо + константан. Эти ГГДТП работоспособны до температур 1300 К и выше; их типичная микроструктура представлена на рис. 5.



**Рис. 5. Микроструктура композиции сталь 12Х18Н9Т+никель, выполненной из слоев толщиной 0,25 мм: а – до травления; б – после травления слоев**

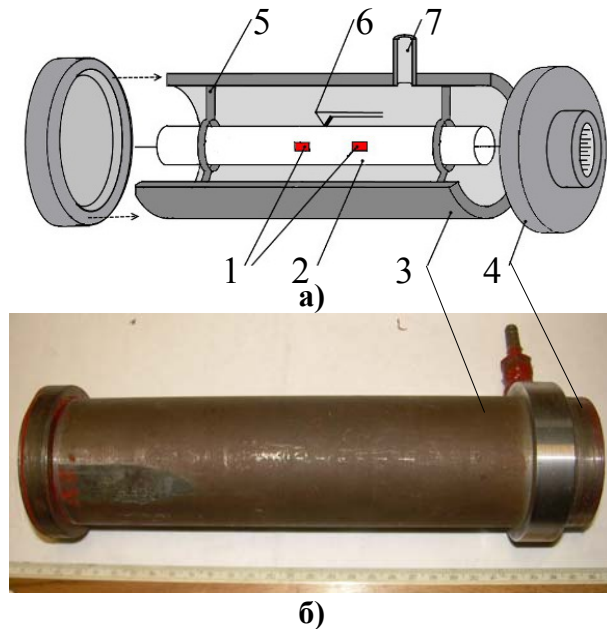
В качестве слоев удалось использовать не только монолитные, но и проницаемые материалы: волокнистые, сетчатые, с регулярной перфорацией и т.д. Датчик становится проницаемым для потоков жидкости или газа. Толкование сигнала такого ГДТП представляет отдельную задачу, но его применение в исследованиях систем вдува, газовых завес и т.д. дает явные и не имеющие аналогов преимущества.

Особый интерес вызывает применение композиций полупроводник-металл и полупроводник-полупроводник, поскольку значения коэффициентов термоЭДС у полупроводников на порядок и более превышают уровень, характерный для металлов.

Методом диффузионной сварки в воздушной среде (при температуре около 820 К и выдержке в течение 1 ч) удалось получить ГГДТП из композиции кремний + алюминий и *n*-кремний + *p*-кремний. Высокая растворимость алюминия в кремнии, традиционно используемая в цветной металлургии, сыграла положительную роль, обеспечив диффузионное соединение с образованием переходной зоны шириной в 5...15 мкм.

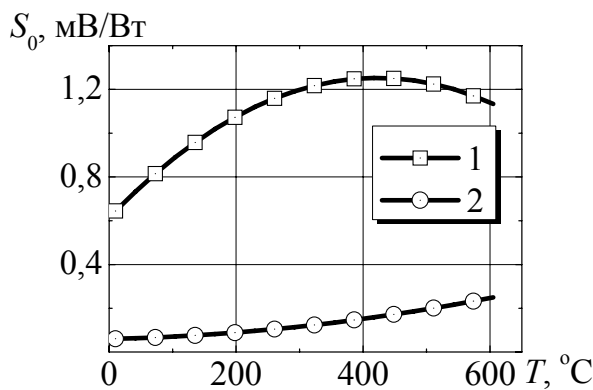
Чаще всего ГДТП градуируют абсолютным методом в стационарном тепловом режиме, но их малое термическое сопротивление и низкая инерционность позволяют использовать также монотонные процессы нагрева и охлаждения. Для градуировки ГГДТП при высоких температурах создан стенд (рис. 6, а), который представляет собой цилиндрический корпус 3 (из стали),

на оси которого в специальных держателях 5 фиксируется трубка из никелевой фольги 2 с вольфрамовым нагревателем внутри. На поверхности трубки 2 установлены исследуемые ГДТП 1 и термопара 6. Корпус 3 закрыт крышками 4 и герметизирован силиконом. В одной из крышек 4 находится герметичный разъем для подачи питания на нагреватель и снятия сигналов с ГДТП и термопары. Через патрубок 7 производится вакуумирование полости стэнда, что позволяет устранить конвективный теплообмен между его элементами. Тепловой поток от нагревателя передается излучением в радиальном направлении к внешним стенкам. Термопара служит для определения температуры отнесения. Результаты типичной градуировки представлены на рис. 6, в. Суммарная стандартная неопределенность косвенных измерений не превышает 10%\*.



что позволяет устранить конвективный теплообмен между его элементами. Тепловой поток от нагревателя передается излучением в радиальном направлении к внешним стенкам. Термопара служит для определения температуры отнесения. Результаты типичной градуировки представлены на рис. 6, в. Суммарная стандартная неопределенность косвенных измерений не превышает 10%\*.

В работе предложено рассматривать триаду «датчик–сигнал–аппаратура» применительно к возможностям цифровой техники. Показано, что любые две компоненты такой триады однозначно определяют третью; так, разрядность аналого-цифрового преобразователя  $k$  выбирается из соотношения



$$k \geq 3,321 \cdot \left( n_s - \lg \frac{FK_y S_0 q_z}{E_{\max}} \right), \quad (8)$$

где  $n_s = 2 \dots 3$  – коэффициент запаса, обеспечивающий различие «сигнал-шум»;  $K_y$  – коэффициент усиления;  $E_{\max}$  – максимальный уровень ожидаемого сигнала ГДТП.

Рис. 6. Схема (а), фотография (б) и градуировочные кривые (в) для композиции сталь 12X18N9Т+никель (кривая 1) и хромель + алумель (кривая 2). Цифрами обозначены: 1 – ГДТП; 2 – трубка; 3 – корпус; 4 – крышка; 5 – держатель; 6 – термопара; 7 - патрубок

В диссертации предложена (и апробирована в лабораторных условиях) система регистрации, обработки и архивирования сигналов ГДТП, позволяющая использовать такие датчики наравне с традиционными термопарами или, при необходимости, совместно с ними.

\*Расчет выполнен согласно «Рекомендациям по межгосударственной стандартизации РМГ 43-2001. Государственная система обеспечения единства измерений».

Главу завершает раздел, посвященный многофункциональности ГДТП. Показано, в частности, что ГДТП может служить термоприемником как «обычного» типа, аналогом терморезистора, так и устройством, не требующим источника электропитания. Последний способ термометрии назван «пассивным», он вдвое сокращает потребность в каналах связи при почти двукратном увеличении информативности.

Показано как использовать ГДТП в расходомерии и при создании индикаторов движения жидкости. Датчики (и преобразователи на их основе) позволяют определить касательные напряжения трения при минимальном нарушении изотермичности течения. Применение ГДТП в электрических сетях позволяет бороться с несанкционированным энергопотреблением.

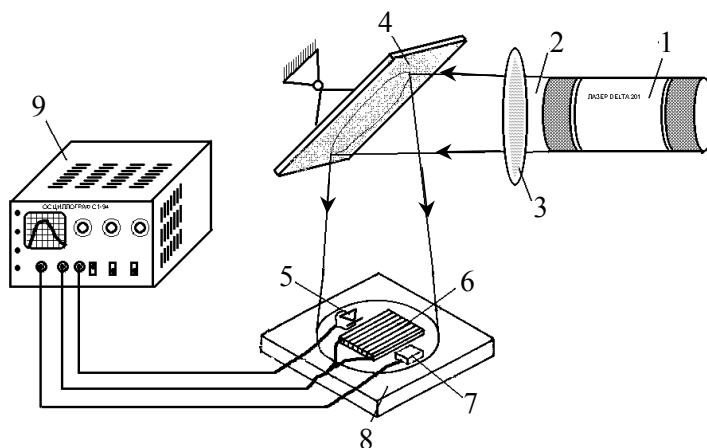
**Глава 2** посвящена динамическим характеристикам ГДТП и их применению в исследовании нестационарных процессов.

Схема стенда для исследования динамических характеристик ГДТП представлена на рис. 7. От лазера 1 луч 2 с начальным диаметром 0,1 мм проходил через оптическую систему 3 и отклонялся зеркалом 4; при этом луч 2 «разводился» до диаметра 15 мм и попадал на фотодиод 5, ГДТП 6 и приемник лазерного излучения 7. Все эти элементы были закреплены на основании 8 с помощью кремнеорганической теплопроводной пасты КПТ-8 и подключены к запоминающему осциллографу 9 модели С1-94. Отметим, что фотодиод 5 (с постоянной времени около 1 мкс) использовался в схеме для практически одновременного с началом облучения запуска осциллографа 9.

Исследование ГДТП толщиной 0,2...4,0 мм показали, что их постоянная времени не зависит от этого размера; можно предположить, что в нестационарном режиме термоЭДС формируется только поверхностным, «горячим» слоем анизотропной среды.

Опыты с лазерами различных типов, на разных длинах волн и режимах генерации подтвердили первые результаты (рис. 8). Использование осциллографа последнего поколения фирмы «Tektronix» показало, что постоянная времени  $\tau_{\min}$  составляет  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с.

Передний фронт сигнала настолько крут, что оценить постоянную времени по экспоненциальной аппроксимации не удастся, однако ценность пред-



**Рис. 7.** Схема стенда для экспериментального исследования динамических характеристик ГДТП. Цифрами обозначены: 1 – лазер; 2 – луч; 3 – конденсорная оптическая система; 4 – зеркало; 5 – фотодиод; 6 – ГДТП; 7 – приемник лазерного излучения; 8 – массивная алюминиевая подложка; 9 – осциллограф

ставляет сам порядок величины: при постоянной времени  $10^{-8}$  с характерные частоты удается довести до уровня  $10^5 \dots 10^6$  Гц, достижимого прежде лишь для датчиков типа ALTP (см. рис. 2, а).

Аналогичным образом определялись динамические характеристики ГДТП. Высокая теплопроводность этих датчиков потребовала большего уровня возмущающего теплового потока, поэтому мы использовали двойной импульсный Nb-YAG-лазер с энергией в импульсе 50...120 мДж и частотой следования импульсов 1...10 Гц, работающий на длине волны 635 нм.

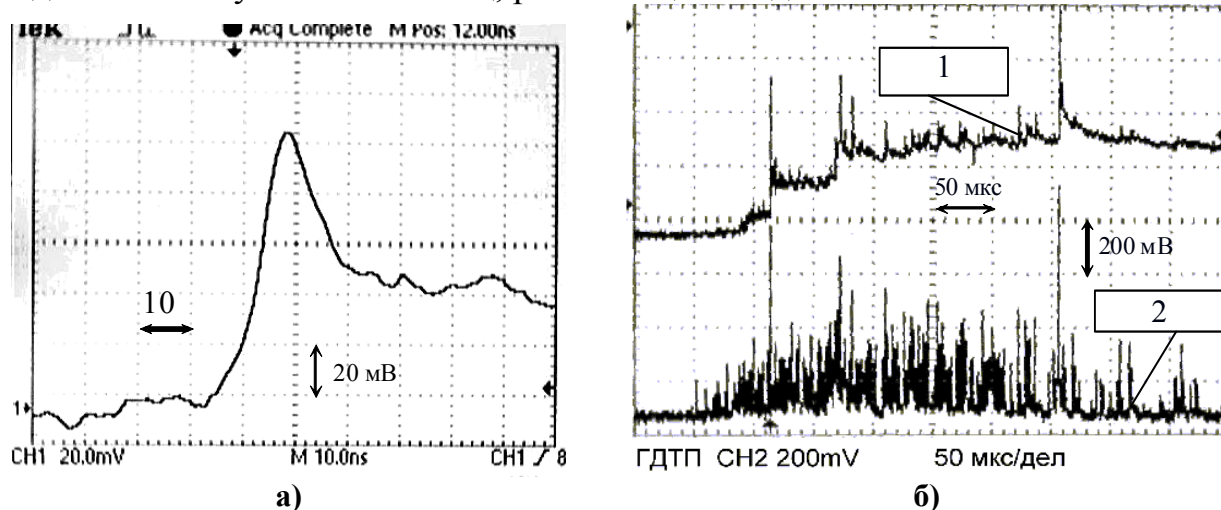


Рис. 8. Динамические характеристики ГДТП из висмута, полученные при воздействии лазера ОГМ-20: а – в моноимпульсном режиме; б – в режиме свободной генерации сигнал ГДТП (кривая 1) в сравнении с сигналом фотодиода ФД-2 (кривая 2)

Объектом исследования послужили ГДТП из композиций сталь 12Х18Н9Т + никель и *n*-кремний + *p*-кремний. Характерные осциллограммы (рис. 9) показывают, что и для этих датчиков постоянная времени имеет указанный выше уровень, причем ГДТП на основе кремния примерно на порядок опережают датчики из висмута по быстродействию.

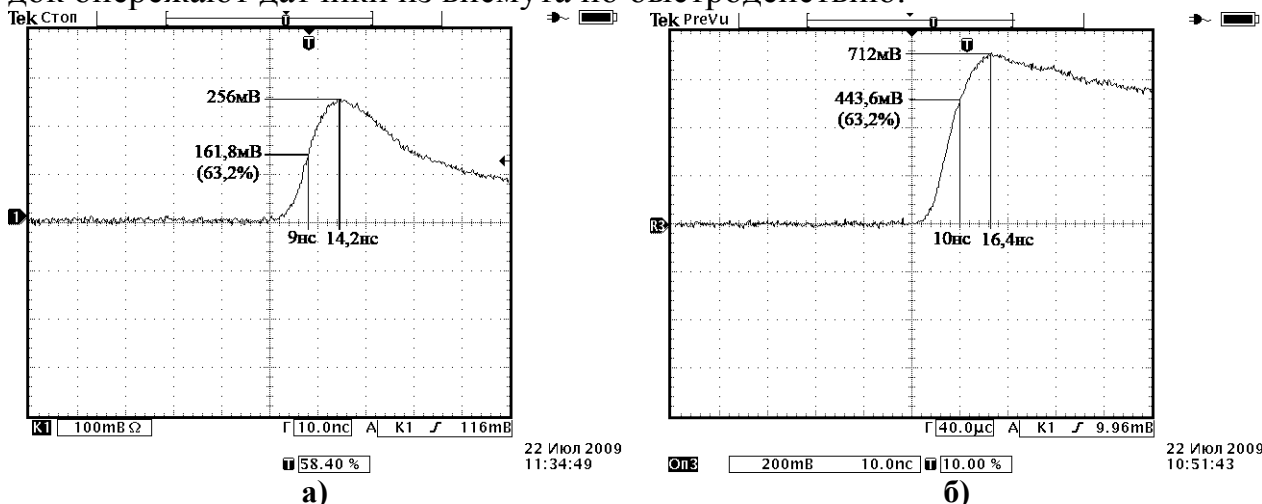


Рис. 9. Осциллограммы динамических характеристик ГДТП: а – для датчиков из висмута (100 мВ/дел, 10 нс/дел); б – для композиции *n*-кремний + *p*-кремний (50 мВ/дел, 100 нс/дел)

Достоверность полученных результатов подтверждается, помимо про-

чего, сравнением с данными, полученными для тех же ГДТП другими исследователями.

Для того чтобы проверить возможность формирования термоЭДС в поверхностном слое ГДТП, в работе предлагается модель, основанная на решении задачи теплопроводности. Крайне малый наклон изотерм в используемых анизотропных средах позволяет использовать решение одномерной нестационарной краевой задачи Фурье для изотропной среды. Показано, что для практически важного начального периода, когда число Фурье  $Fo = a\tau / x^2 = 5 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1}$  (здесь  $a$  – эффективная температуропроводность ГДТП,  $\tau$  – текущее время,  $x$  – координата, совпадающая с направлением вектора  $\vec{q}$ ), достаточно воспользоваться моделью полуограниченного тела.

С использованием интегрального метода теплового баланса показано, что толщина термически прогретого слоя

$$h = \sqrt{6a\tau}, \quad (9)$$

что при  $\tau_{\min} \approx 10^{-8}$  с соответствует  $(3,4 \dots 6,0) \cdot 10^{-7}$  м для ГДТП всех существующих видов и превышает уровень  $(1,0 \dots 2,0) \cdot 10^{-7}$  м, при котором возможны термоэлектрические явления.

Сопоставление динамики ДТП продольного и поперечного типов показало, что в стационарном режиме их возможности почти одинаковы, но термическое сопротивление ГДТП на несколько порядков меньше. В нестационарном режиме постоянная времени ГДТП из висмута примерно в  $2,5 \cdot 10^7$  раз меньше, чем у ДТП продольного типа модели ПТП 1Б.11.2.1.11.П00.1.16.00.0.

Быстродействие ГДТП позволила использовать их для теплотрии в ударных трубах. Помимо важной (и полученной впервые) информации о природе физических процессов, эти опыты интересны с прикладной стороны, поскольку сходные (по характерному времени) процессы возникают в МГД-технологиях и других перспективных способах преобразования теплоты. Кроме того, удалось оценить помехозащищенность ГДТП в потоке ионизированного газа и низкотемпературной плазмы и прогнозировать их использование в промышленных условиях.

Опыты, выполненные на ударных трубах ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (рис. 10), кафедр «Гидроаэродинамика» и «Теоретические основы теплотехники» ГОУ «СПбГПУ», показали, в частности, что, вопреки сложившимся представлениям, температура в торце ударной трубы возрастает монотонно, а плотность теплового потока не меняется скачком. Если ранее расхождение теории с экспериментом относили на счет инерционности датчиков, то при различии между  $\tau_{\min}$  и временем опыта в  $10^5$  раз такое объяснение исключается.

Градиентная теплотрия на стенке плоского сверхзвукового сопла в присутствии поля напряженностью до 4 Тл позволила получить зависимость плотности теплового потока  $q$  от числа Стюарта  $S = (B_0^2 l_0 \sigma_c) / (\rho w)$  ( $B_0$  – характерное значение магнитной индукции,  $w$  – скорость движения среды,  $l_0$  – характерный размер пластины сопла,  $\sigma_c$  и  $\rho$  – удельная электропроводность и плотность

среды, соответственно) (рис.11).

Через 500 мкс для кривой, соответствующей  $S = 0,42$ , и через 1,1 мс для кривой, соответствующей  $S = 0,32$ , наблюдается резкий рост плотности теплового потока.

Мы связываем это с возникновением отрывного течения в сопле перед пластиной, инициированного МГД взаимодействием (ср. кривую при  $S = 0$ ).

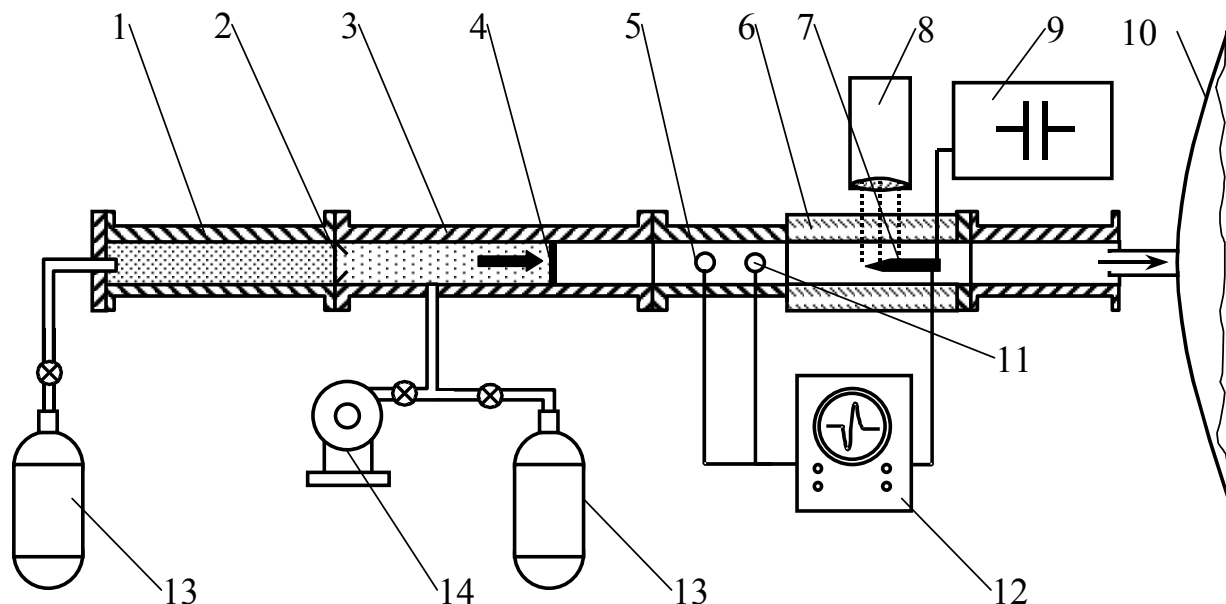


Рис. 10. Схема ударной трубы ФТИ им.А.Ф. Иоффе РАН. Цифрами обозначены: 1 – камера высокого давления; 2 – диафрагма; 3 – камера низкого давления; 4 – фронт ударной волны; 5 – датчик давления; 6 – вакуумная камера; 7 – испытуемое тело; 8 – система оптических измерений; 9 – источник высокого напряжения;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

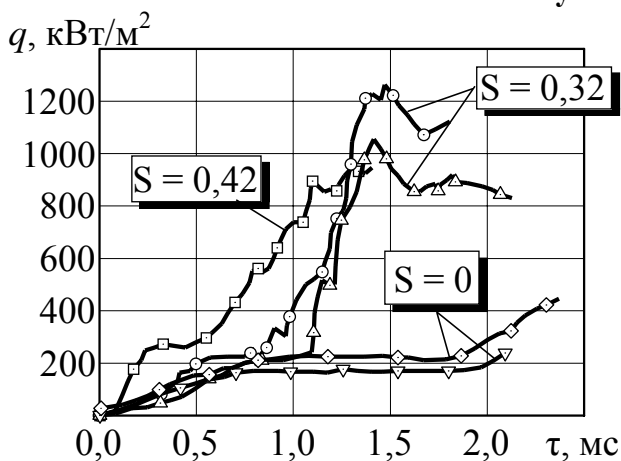


Рис. 11. Плотность теплового потока на стенке сопла в зависимости от наличия и напряженности магнитного поля

Исследовалось также изменение плотности теплового потока на поверхности тела, обтекаемого потоком азота; модель и электрическая схема установки представлены на рис. 12.

Параметры сверхзвукового потока азота в выходном сечении сопла были следующими: давление – 5 кПа, плотность –  $0,04 \text{ кг/м}^3$ , температура – 440 К, скорость – 1600 м/с число Маха – 4. Длительность стационарного истечения азота составляла 1,5 мс. 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; в результате плазма приобретает вращательное движение вокруг тела в азимутальном направлении. В предваритель-

ных экспериментах обнаружена существенная зависимость частоты вращения плазмы от полярности подключения внешнего источника.

Тепловой поток на поверхности тела вращения измерялся для обоих вариантов подключения. ГДТП, имевшие размеры в плане  $2 \times 2$  мм, были смонтированы на цилиндрической части тела вращения в 15 мм от кольцевого

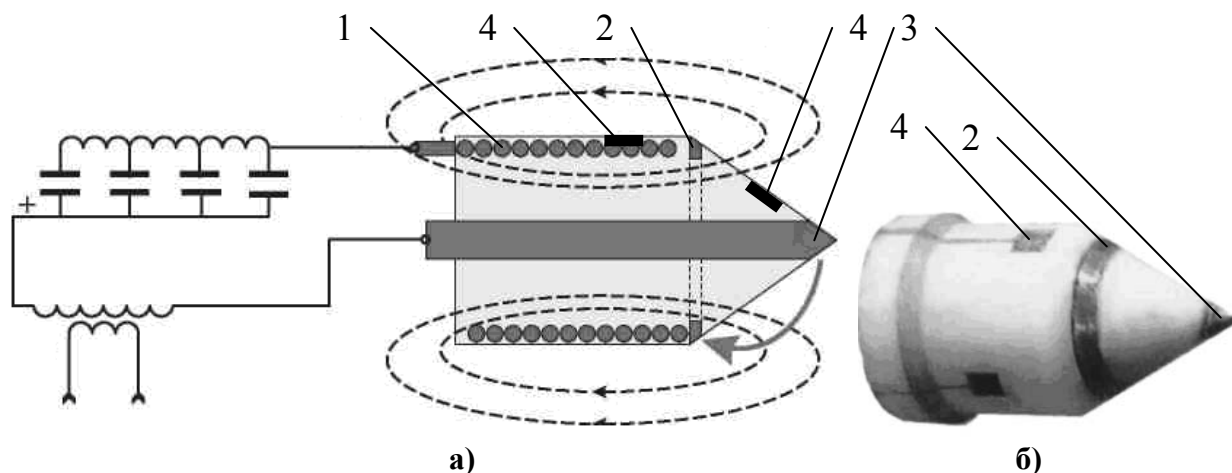


Рис. 12. Модель (а) и фотография (б) тела, обтекаемого потоком плазмы, и электрическая схема установки: 1 – соленоид; 2 – кольцевой электрод; 3 – центральный электрод; 4 – ГДТП

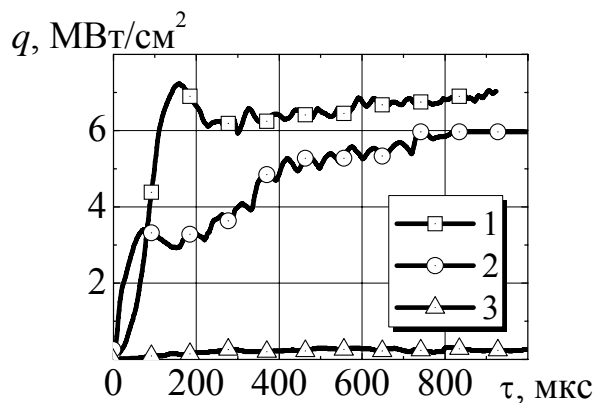


Рис. 13. Изменение плотности теплового потока на поверхности модели, обтекаемой сверхзвуковым потоком азота, в случаях, когда кольцевой электрод служит: 1 – катодом; 2 – анодом; 3 – плотность теплового потока при выключенном МГД-устройстве

электрода. Результаты опытов представлены на рис. 13.

Для варианта подключения, когда кольцевой электрод служит анодом (кривая 2), частота пульсации 15 кГц соответствует частоте вращения плазмы, измеренной с помощью фоторегистратора. В случае, когда кольцевой электрод служит катодом, частота вращения плазмы вдвое больше (кривая 1).

Таким образом, экспериментально установленный уровень постоянной времени ГДТП ( $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с) делает их практически безынерционными датчиками теплового потока в большинстве теплотехнических процессов, а высокая помехозащищенность позволяет применять даже в присутствии сильных электромагнитных полей.

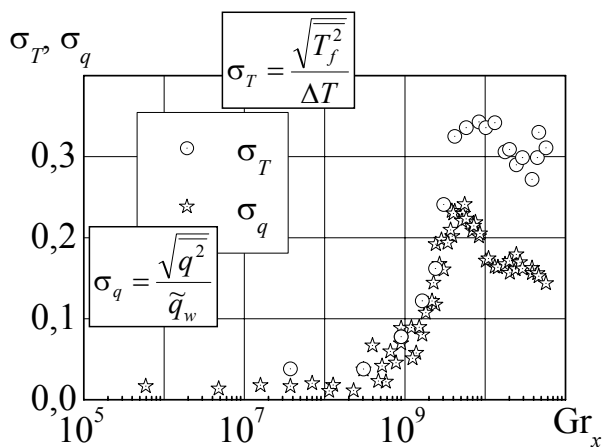
**Глава 3** посвящена тестированию средств и методов градиентной теплометрии в экспериментах, связанных с различными видами теплообмена.

С помощью ГДТП исследовался свободно-конвективный теплообмен на вертикальной пластине высотой 4950 мм и шириной 900 мм, нагреваемой электрическим током. Результаты опытов сопоставлялись с данными термоанемометрии, полученными на той же пластине Ю.С. Чумаковым и др.

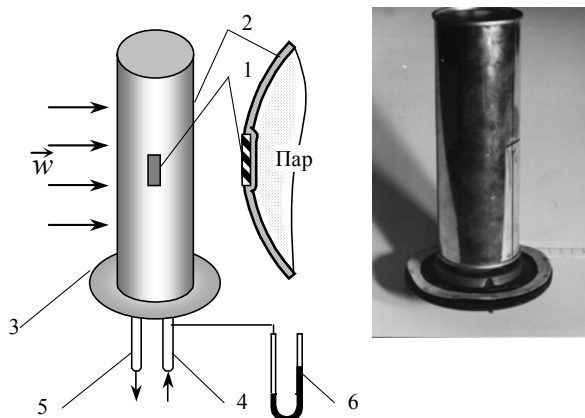


Методами градиентной теплотметрии исследовались три режима течения в пограничном слое: ламинарный, переходный и турбулентный, вплоть до числа Грасгофа  $Gr_x = g\beta\Delta T x^3 / (v^2) = 3,5 \cdot 10^{11}$  (здесь  $g$  – ускорение свободного падения,  $\beta$  – коэффициент объемного термического расширения воздуха,  $x$  – расстояния от нижней кромки пластины до точки измерения).

Местные значения плотности теплового потока (при условии, что степень черноты пластины и ГДТП практически одинаковы) совпадают в пределах погрешности эксперимента, что подтверждает правомерность использования градиентной теплотметрии. Помимо этого, использование ГДТП позволило получить новые данные по нестационарному распределению мгновенной плотности теплового потока на



**Рис. 14.** Интенсивность пульсаций плотности теплового потока и температуры на вертикальной пластине



**Рис. 15.** Модель цилиндра, обтекаемого поперечным потоком воздуха: 1 – ГДТП; 2 – цилиндр; 3 – стол; 4 – подвод пара; 5 – слив конденсата; 6 – манометр

сравнению с величиной  $\sigma_T$ . Так, по-видимому, и должно быть: по мере увеличения числа Грасгофа сначала возрастает интенсивность пульсационного движения в воздухе (что способствует резкому увеличению притока холодных масс воздуха в пограничный слой), и только после этого холодный воз-

дух нагретой вертикальной поверхности и оценить пульсационную составляющую этого потока для исследуемых режимов течения.

На рис. 14 представлено распределение интенсивности пульсаций плотности теплового потока  $\sigma_q = \sqrt{q^2} / \tilde{q}_w$  ( $q$  – пульсационная составляющая плотности теплового потока при данном значении текущей координаты  $x$ ;  $\tilde{q}_w$  – средняя плотность теплового потока при том же значении  $x$ ) по высоте пластины. На этом же рисунке, для сравнения, изображена зависимость максимального значения интенсивности пульсаций температуры воздуха в текущем сечении пограничного слоя  $\sigma_T = \sqrt{T_f^2} / \Delta T$  от продольной координаты (здесь  $T_f$  – пульсационная составляющая температуры при постоянном температурном напоре  $\Delta T$ ).

Можно отметить небольшое запаздывание (по числу Грасгофа  $Gr_x$ ) в возрастании интенсивности пульсаций плотности теплового потока  $\sigma_q$  по

дух достигает поверхности. Как следствие, на фоне возрастающих пульсаций плотности теплового потока на поверхности пластины увеличивается доля теплового потока, передаваемая конвективным путем.

Исследование поперечного обтекания одиночного цилиндра выполнялось на модели (рис.15), обогреваемой насыщенным водяным паром (с температурой около 100°C).

Модели устанавливались в рабочей части аэродинамической трубы ( $Tu \leq 0,8\%$ ,  $w \leq 25$  м/с); исследовались цилиндры длиной 500 мм и диаметром 25, 66 и 166 мм. ГДТП размерами 4×7 мм имели вольт-ваттную чувствительность 9,8...20 мВ/Вт и перекрывали азимутальный угол 2,8...18,5°.

Местные коэффициенты теплоотдачи рассчитывались по формуле

$$\alpha_{\varphi}(\tau) = \frac{q_{\varphi}(\tau)}{T_w - T_f},$$

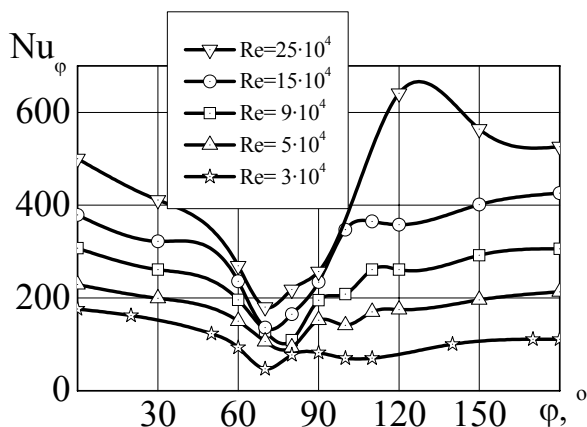
где  $q_{\varphi}(\tau)$  – местные значения плотности теплового потока, измеренные при фиксированном значении  $\varphi$ .

Результаты опытов были обработаны как зависимости

$$Nu_{\varphi} \Big|_{Re=const}(\varphi), \frac{Nu_{\varphi}}{\sqrt{Re}}(\varphi), \frac{Nu_{\varphi}}{Nu_0}(\varphi), \overline{Nu} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} Nu_{\varphi} d\varphi,$$

где  $Nu_0(\varphi)$  – значение числа Нуссельта в лобовой точке ( $\varphi = 0$ ), а число

Рейнольдса  $Re = wd/\nu$  определялось по средней скорости потока  $w$  и кинематической вязкости воздуха  $\nu$ , взятой при температуре  $T_f$ .



**Рис. 16. Результаты определения местных коэффициентов теплоотдачи на поверхности поперечно обтекаемого цилиндра**

Как видим (рис. 16), полученные данные достаточно близки к результатам, хорошо известным и признанным надежными. Особенно интересно совпадение наших результатов с данными работы Х.Накамуры и Т.Игараши, которые использовали ДТП фирмы «Vatell». Хорошее совпадение наблюдается во всех случаях, включая минимальные значения  $Nu$  вблизи  $\varphi = 85^\circ$ .

В опытах исследовались пульсации скорости, давления и плотности теплового потока. Чтобы исследовать корреляцию между коэффициентом теплоотдачи и пульсациями скорости, на удалении 1,5 мм от ГДТП (и при том же угле  $\varphi$ ) помещался термоанемометр. В опытах удалось преобразовать аналоговый сигнал ГДТП в цифровой с частотой до 30 кГц; каждое измерение вы-

полнялось  $6 \cdot 10^4$  раз с частотой 2 кГц. Экспериментальные данные обработаны в виде критерия интенсивности пульсаций плотности теплового потока  $\eta = (\sqrt{q'_{\varphi}{}^2} / \bar{q}_{\varphi}) \cdot 100\%$ , где  $\sqrt{q'_{\varphi}{}^2}$  – среднеквадратичное значение пульсаций плотности теплового потока при фиксированном угле  $\varphi$ ;  $\bar{q}_{\varphi}$  – средняя плотность теплового потока при том же угле  $\varphi$ . Статистическая обработка позволила определить дисперсию плотности теплового потока  $D = \sigma^2 = \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 / (n - 1)$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение;  $\bar{q}$  – среднее арифметическое измеряемой плотности теплового потока.

Вид кривых  $\eta(\varphi)$  и  $D(\varphi)$  (рис. 17) согласуется с результатами известных работ как качественно, так и количественно.

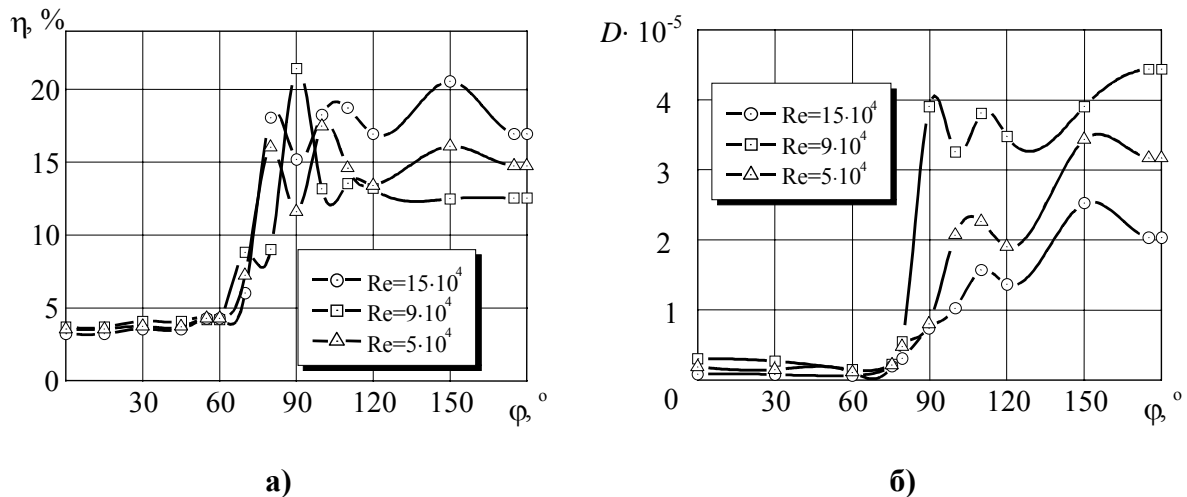


Рис.17. Интенсивность пульсаций плотности теплового потока (а) и дисперсия плотности теплового потока (б)

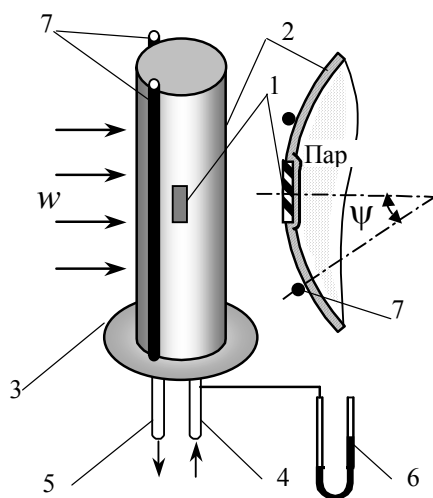


Рис. 18. Схема установки турбулизаторов на цилиндр: 1 – ГДТП; 2 – цилиндр; 3 – стол; 4 – подвод пара; 5 – слив конденсата; 6 – манометр; 7 – турбулизаторы

Исследовался также теплообмен на поверхности цилиндра, имеющего турбулизаторы в виде стержней, параллельных образующей и разнесенных относительно лобовой точки на угол  $\pm \psi$  (рис. 18).

В ходе опытов подобран оптимальный угол установки турбулизаторов: при  $\psi = \pm 55^\circ$  местный коэффициент теплоотдачи на угле  $\varphi = 70^\circ$  возрастает в 4 раза по сравнению с гладким цилиндром, а средний по окружности коэффициент теплоотдачи – в 1,25 раза (рис. 19, а).

Дисперсия пульсаций плотности теплового потока (рис.19, б) для цилин-

дра с турбулизаторами существенно отличается от дисперсии пульсаций на гладком цилиндре. Здесь турбулентность влияет на тепловой поток по иному: вплоть до  $\varphi=70\dots90^\circ$  дисперсия возрастает несущественно, а в области  $90\dots120^\circ$  наблюдается резкий ее всплеск. Поток «запоминает» добавочное возмущение, пульсации в толщине пограничного слоя возрастают далеко за точкой отрыва, но их влияние на теплообмен сводится к нулю задолго до приближения дисперсии к уровню, достигаемому на гладком цилиндре.

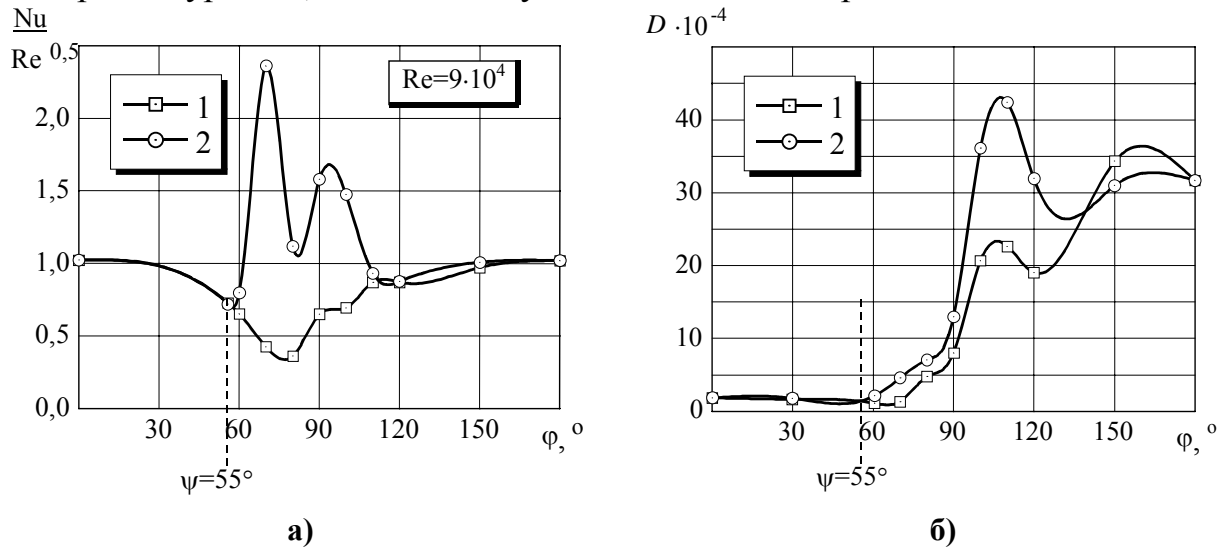


Рис. 19. Местные безразмерные коэффициенты теплоотдачи на поверхности (а) и дисперсия плотности теплового потока (б) при обтекании гладкого цилиндра (1) и цилиндра с турбулизаторами, установленными под углами  $\pm 55^\circ$  к набегающему потоку (2)

Следующим этапом работы стало исследование местной плотности теплового потока на поверхностях теплообмена с турбулизаторами (лунками, кавернами, траншеями и т.д.) (рис. 20).

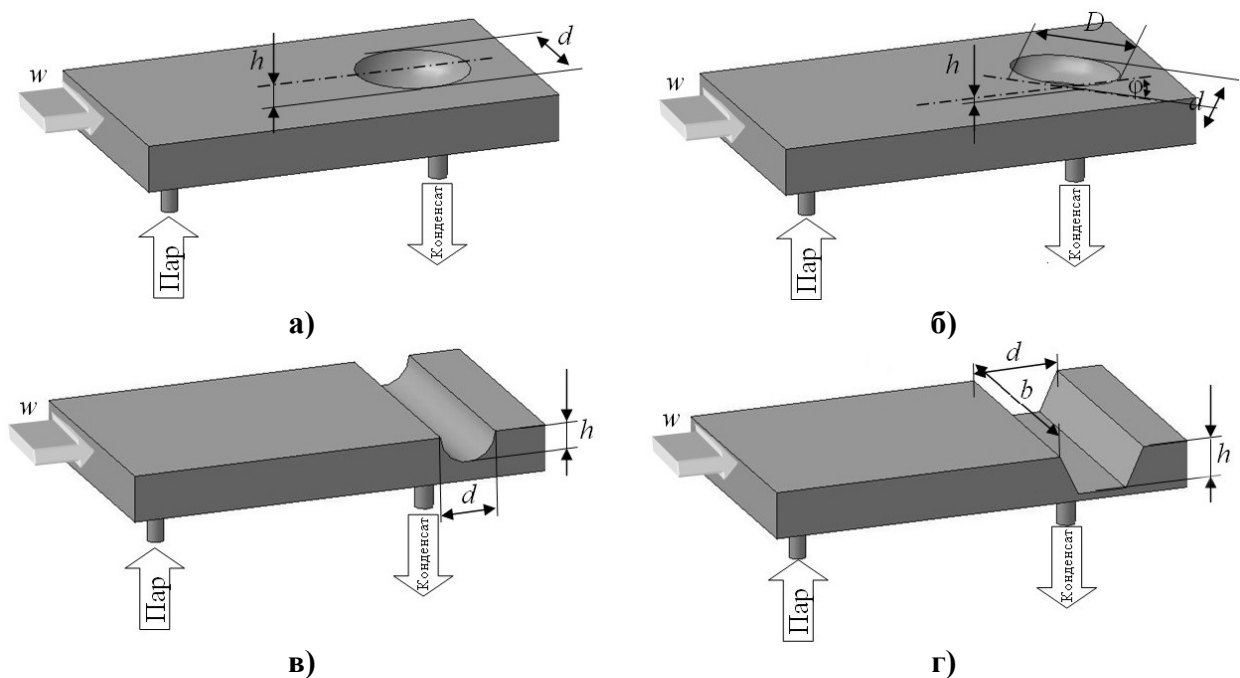
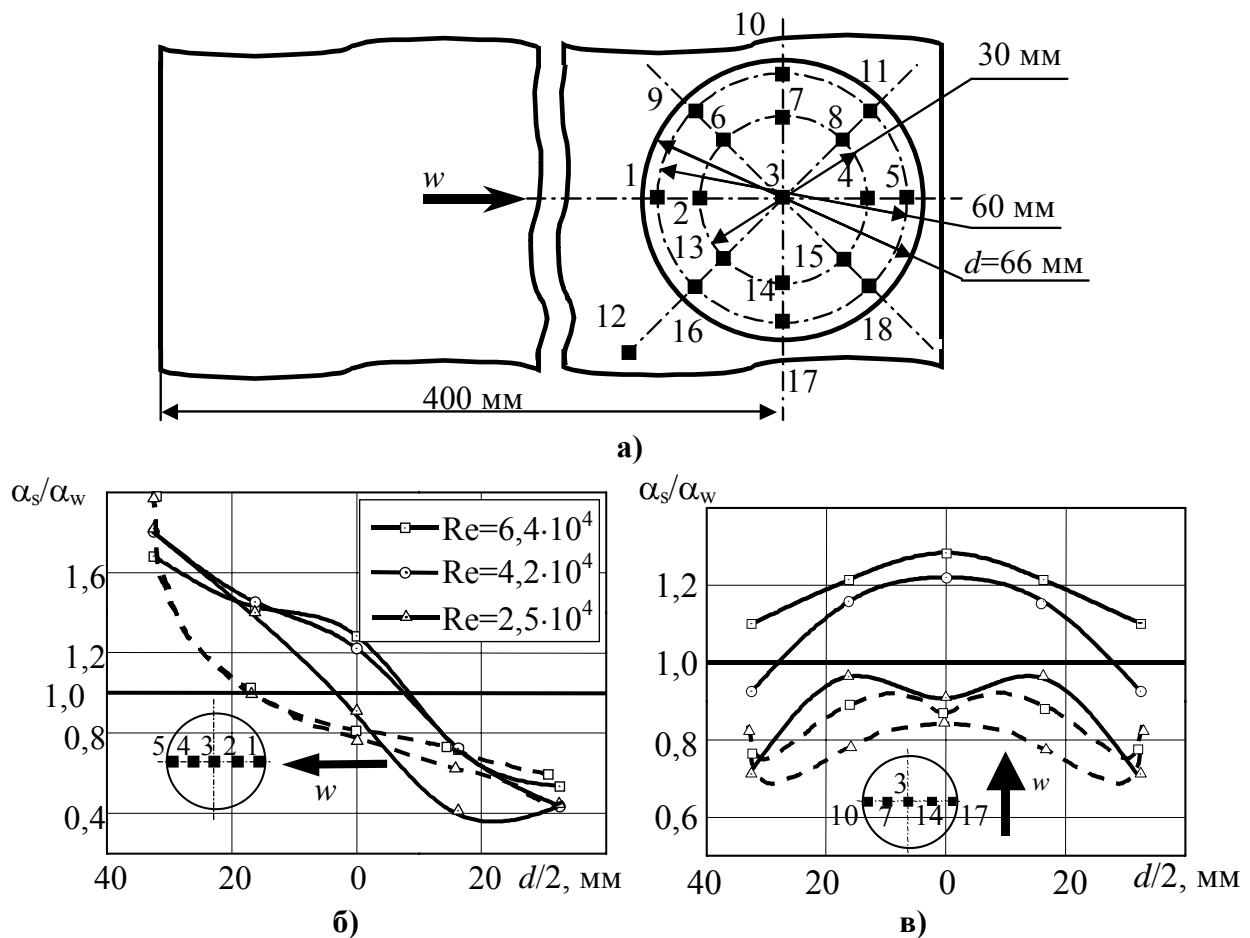


Рис. 20. Схемы обогреваемых паром пластин с турбулизаторами: а – сферическая лунка; б – вытянутая лунка; в – цилиндрическая траншея; г – траншея трапециевидного сечения

Достаточно типичны результаты исследования сферических лунок разной относительной глубины ( $h/d=0,1\dots0,5$ ). В первых сериях опытов ГДТП размещались на поверхности лунки и (для контроля) на пластине перед ней (рис. 21, а). Измерения были обработаны в виде зависимостей  $\alpha_s/\alpha_w$  (Re) (индекс «s» относится к величинам, измеряемым на сферической поверхности лунки, а индекс «w» – на плоскости;  $Re=wd/\nu$ , где  $d$  – диаметр лунки) (рис. 21, б, в).

Определялись также значения  $\alpha_w$  в шлейфе за лункой (на удалении до  $2,5d$ ). Результаты опытов коррелируют с данными литературы; одновременно установлено, что результаты численного моделирования нуждаются в уточнении.



**Рис. 21.** Исследование теплообмена в сферической лунке с относительной глубиной  $h/d=0,14$ : а – вид модели с ГДТП (обозначены квадратиками) сверху; б, в – результаты опытов по данным измерений в продольном и поперечном сечениях, соответственно

Трудоемкость монтажа и сложность коммутации ГДТП вызвали необходимость в существенной переделке установки: лунку (вместе с паровой рубашкой) удалось сделать поворотной частью модели, а все ГДТП расположить на одном меридиане (рис. 22).

Измерения проводились на лунке диаметром 72 мм и глубиной  $h = 15$  мм ( $h/d = 0,2$ ). Показания ГДТП из висмута площадью  $25 \text{ мм}^2$  снимались с усреднением на временном интервале в 20 с.

Для обработки результатов опыта и построения трехмерных распределений плотности теплового потока в зависимости от полярных координат с центром, находящимся на оси лунки (рис.23, а), использован пакет прикладных программ Surfer 5,0. Этот же пакет позволяет представить данные в виде системы изолиний (рис.23, б).

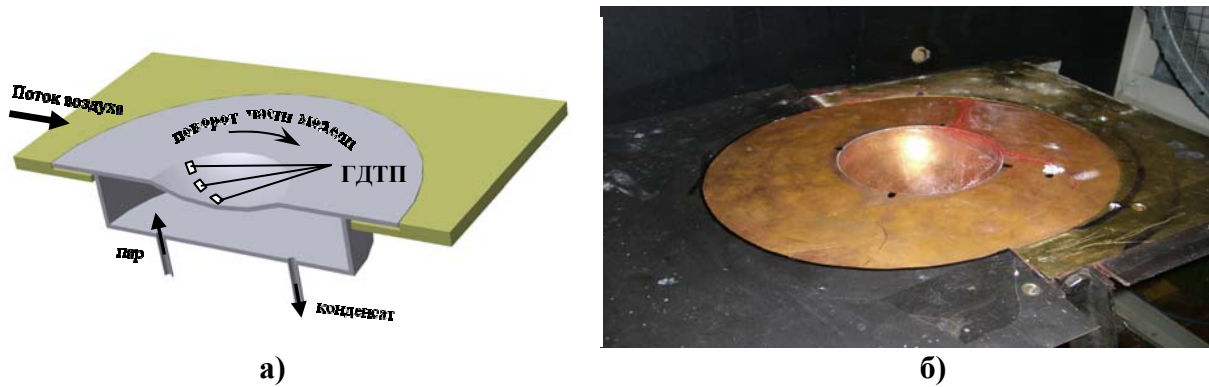


Рис. 22. Схема (а) и общий вид (б) модели лунки с поворотной частью

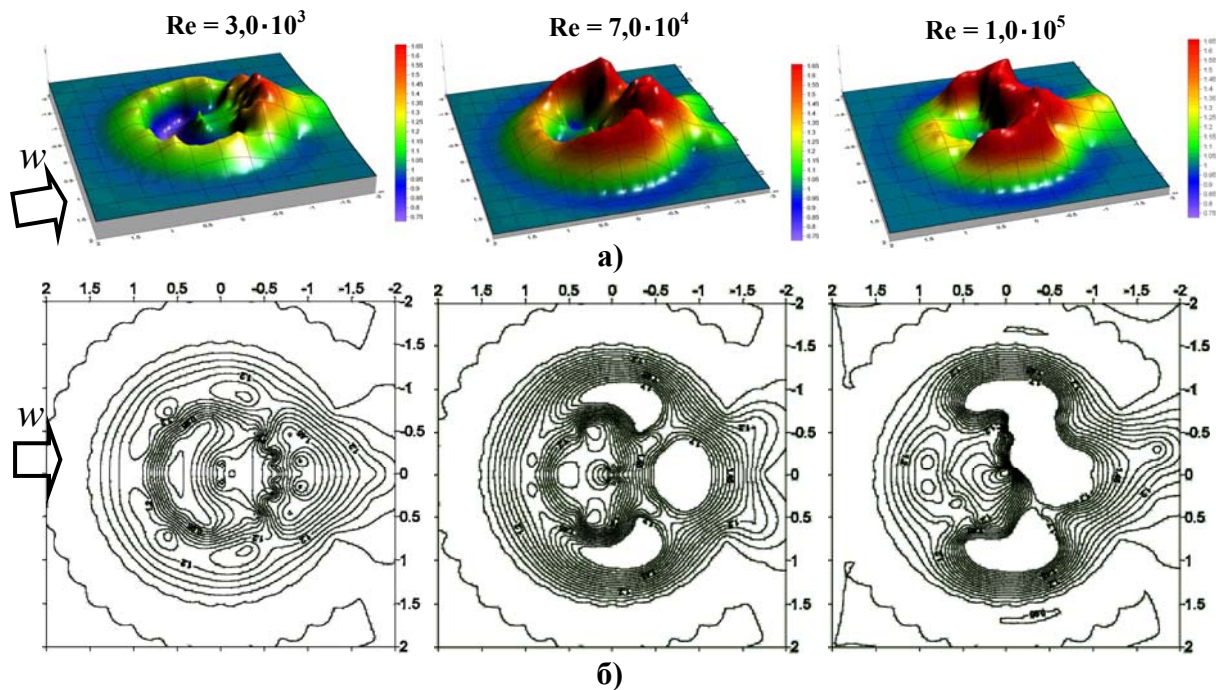


Рис. 23. Поле плотности теплового потока в сферической лунке относительной глубиной  $h/d = 0,2$ : а – трехмерная визуализация поля; б – изолинии на поверхности лунки

Приведенный пример показывает, что сравнительно небольшого количества ГДТП достаточно для построения информативной и наглядной картины теплообмена. Важно, что в результате опытов получены усредненные по времени коэффициенты теплоотдачи: именно эти величины существенны для оптимизации теплообменных элементов в теплоэнергетических установках.

Суммарная стандартная неопределенность коэффициента теплоотдачи не превышала  $0,99 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Относительная погрешность определения коэффициента теплоотдачи при типичном  $\alpha \approx 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$  составляла  $0,99\%$ .

Использование ГДТП для измерения радиационных тепловых потоков

позволило создать чувствительный элемент (ЧЭ) для индикации облучения объекта мощным потоком фотонов. ЧЭ представляет собой полушар из алюминия (рис. 24,а), на поверхности которого выполнены «террасы», покрытые ленточными ГДТП (общая длина ленточки АТЭ сечением 0,25×0,25 мм, уложенной на полушар диаметром 20 мм, превысила 14 м). ГДТП соединены последовательно, а их токовыводы пропущены через каналы в полушаре и далее подсоединены к компактному разъему. Для повышения «живучести» ЧЭ снабжен радиационным экраном.

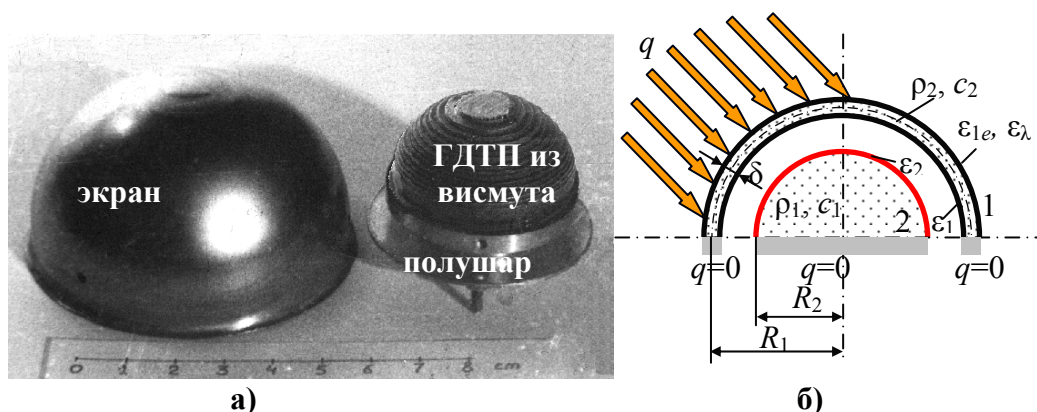


Рис. 24. Чувствительный элемент с радиационным экраном: а – общий вид; б – схема, поясняющая тепловую модель

Предложенная в работе тепловая модель сводит задачу конструирования ЧЭ к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{dU_1}{d\tau} = \frac{q_\lambda \varepsilon_\lambda - C_0 \left\{ \left[ \varepsilon_{1e} + \varepsilon_{1-2} \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 \right] U_1^4 - \varepsilon_{1-2} \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 U_2^4 \right\}}{100 c_1 \rho_1 \delta_1}; \\ \frac{dU_2}{d\tau} = \frac{(U_1^4 - U_2^4) \cdot 3C_0 \varepsilon_{1-2}}{100 c_2 \rho_2 R_2}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $U_1 = T_1/100$ ,  $U_2 = T_2/100$ , а смысл остальных обозначений ясен из рис. 24, б.

Изменение температуры на поверхностях экрана и полушара, а также расчетный сигнал ЧЭ, определенные при  $q=0,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, представлены на рис. 25; они соответствуют результатам испытаний опытного образца.

Выходной сигнал ЧЭ превышает 4 В, что, даже при невысокой вольт-ваттной чувствительности ( $S_0=1,7 \dots 1,8$  мВ/Вт), позволяет отказаться от дополнительного усиления.

Примером весьма сложного и существенно нестационарного теплообмена традиционно считают процесс, протекающий в цилиндре двигателя внутреннего сгорания.

Выполненная автором в 1996-1997 гг. натурная градиентная теплометрия в камере сгорания дизельного двигателя до настоящего времени остается единственной в мире.

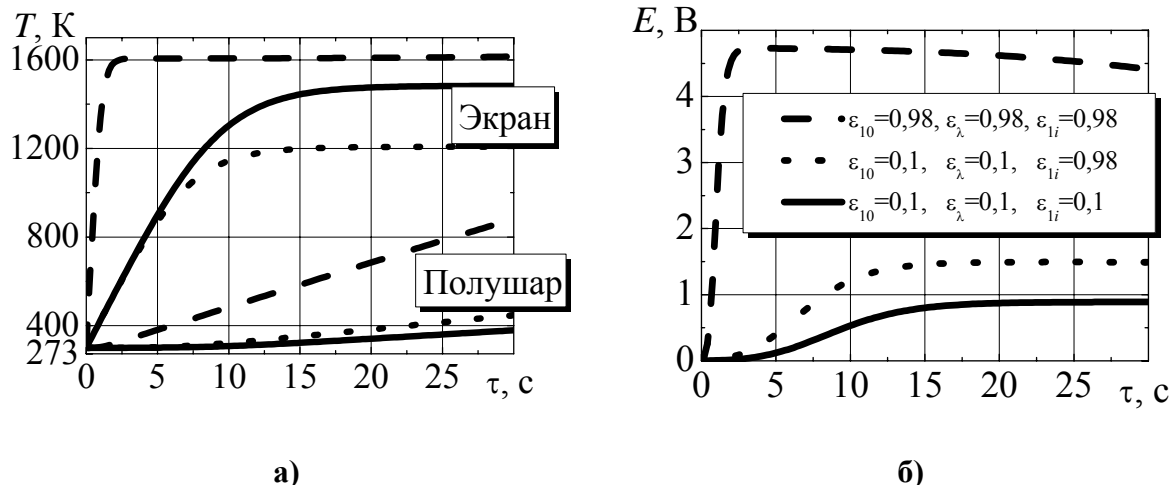


Рис. 25. Изменение температуры (а) и расчетного сигнала ЧЭ (б) в зависимости от степени черноты экрана

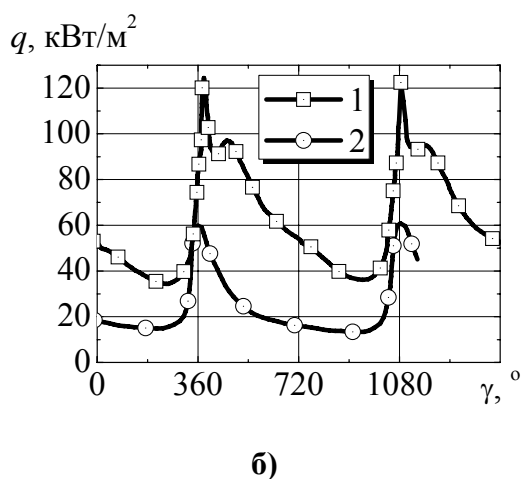
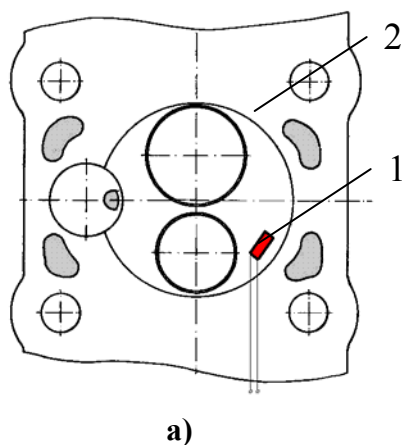


Рис. 26. Определение местной плотности теплового потока в камере сгорания: а – размещение ГДТП (1 – ГДТП, 2 – крышка блока цилиндров); б – зависимость плотности теплового потока от угла поворота коленчатого вала (1 – сгорание, 1320 об/мин, 2 – сжатие без топливоподачи, 870 об/мин)

Применение ГДТП позволило экспериментально исследовать нестационарную теплоотдачу от газа к поверхности камеры сгорания четырехтактного дизельного двигателя Indenor XL4D производства концерна PSA Peugeot Citroën. Основные характеристики двигателя: вихрекамерный, степень сжатия 23, максимальная мощность 35 кВт при 5000 об/мин, максимальный крутящий момент 84,3 Н·м при 2500 об/мин. ГДТП размещали на огневой поверхности камеры сгорания так, чтобы сделать вывод проводов наиболее удобным (рис.26, а).

В первой серии опытов коленчатый вал прокручивали без подачи топлива (на частотах 250 и 870 об/мин), во второй – топливо подавалось по штатной схеме, а частоты составляли 900 и 1320 об/мин.

Видно, что максимум плотности теплового потока приходится на ВМТ, хотя практически во всех работах по теплотерии в ДВС приводятся зависимости плотности теплового потока от угла поворота коленчатого вала, на которых максимум плотности теплового потока «отстает» от ВМТ. Это вызвано, в основном, большой постоянной времени традиционно применяемых термоприемников, а также тем, что изменение температуры стенок каме-



ры сгорания (и, следовательно, термопар) обычно отстает от изменения температуры газа, что вносит фазовую ошибку в рассчитанный по данным термометрии тепловой поток. В наших опытах наблюдалось также различие в амплитуде колебаний плотности теплового потока в соседних циклах, что может быть вызвано как неравномерностью в движении заряда, так и неравномерностью топливоподачи от цикла к циклу.

При сгорании топлива (рис. 26, б, кривая 1) видны два максимума плотности теплового потока, что характерно для двигателей с разделёнными камерами сгорания. Первый максимум достигается вблизи ВМТ, а второй – в  $70...80^\circ$  от ВМТ. Теория и физические представления о таком процессе освещены в специальной литературе, однако экспериментального подтверждения «двойной максимум» до этих опытов не имел.

Интересно, что на всех кривых тепловой поток сохраняет знак. Это свидетельствует о том, что огневая поверхность в зоне измерения не успевает охладиться в такте всасывания, а плотность теплового потока пульсирует, не меняя знака.

Таким образом, в главе 3, помимо тестирования датчиков и методики градиентной теплотметрии, удалось получить ряд принципиально новых и представляющих прикладной интерес результатов.

**Глава 4** посвящена градиентной теплотметрии в топках котельных установок. До настоящего времени о местной плотности теплового потока на поверхностях экранных труб и плавников удавалось судить лишь по показаниям термовставок – коротких трубок с термопарами, врезанных в контур высокого давления. Расчетная методика недостаточно обоснована, измерения трудоемки и, что главное, нарушают герметичность системы, а потому крайне нежелательны. Как следствие, информация о распределении плотности теплового потока на поверхности топки остается скудной, а принципиально иные подходы до последнего времени не развивались.

Помимо прочего, по изменению (во время эксплуатации) плотности теплового потока можно судить о загрязнении (шлаковании) труб – и, если приняты меры – их освобождению от шлака; такая возможность появляется только в случае, когда зон измерения достаточно много.

Отсутствие в мировой практике опыта теплотметрии в топках с применением ГГДТП потребовало выполнить серию предварительных исследований.

В работе использовались ГГДТП, выполненные из композиции сталь 12X18H9T + никель. Толщина слоёв составляла 0,1 мм, угол разреза –  $45\pm 5^\circ$  к плоскости заготовки, толщина датчика – 0,2 мм, размеры в плане –  $7\times 10$  мм. В крайних точках пластин подсоединялись токосъемные проводники. С учетом запланированного попарного расположения датчиков на измерительной вставке (фронтального и бокового) в качестве проводов использовались две стандартные хромель-алюмелевые термопары. Хромелевые провода подсоединялись к одному из ГДТП, алюмелевые – к другому; при этом обеспечивалась термостойкость сборки и исключался вклад термоЭДС электродов.

В качестве исходного макета для создания измерительной ячейки использовалась температурная вставка ЦКТИ (рис.27, а).

Градуировка (рис. 27, б) осуществлялась на специально созданном стенде: электрический нагреватель располагался соосно с трубой вставки. Его мощность, регулируемая автотрансформатором, поддерживала «опорную» температуру стенки в пределах от 370 до 630 К. Таким образом удавалось моделировать реальное тепловое состояние стенки, охлаждаемой пароводяной смесью.

Перед градуировкой поверхность вставки доводилась (покрытием сажей) до степени черноты 0,98...0,99. Источником нагрева служил экран, разогреваемый снаружи с помощью газовой горелки.

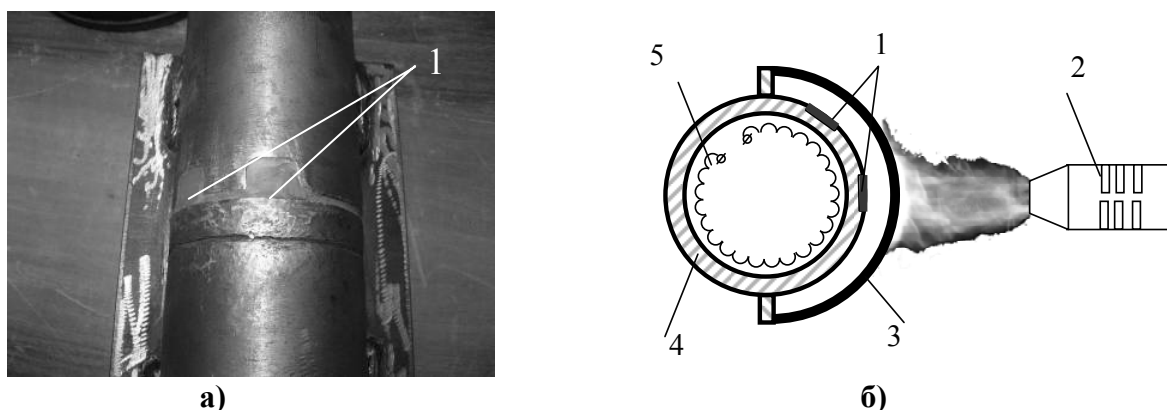


Рис.27. Схема измерительной вставки и градуировочной ячейки: а – общий вид вставки без экрана с установленными ГДТП; б – схема градуировочной обвязки на вставке с датчиками: 1 – ГДТП; 2 – горелка; 3 – экран-излучатель; 4 – труба; 5 – электронагреватель

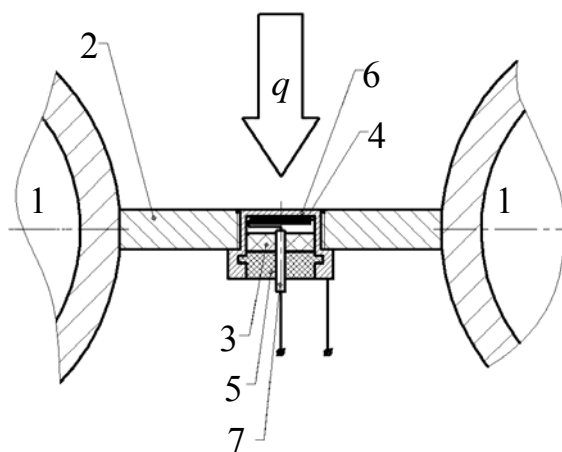


Рис. 28. Способ монтажа ГДТП на плавнике. Цифрами обозначены: 1 – экранные трубы; 2 – плавник; 3 – измерительная пробка; 4 – ГДТП под слоем электроизоляции; 5 – стальная вставка с прорезями под провода; 6 – термостойкая паста; 7 – коммутационные провода

ного компаунда, закрывались слоем слюды и защитным экраном из стали

Плотность теплового потока определялась из уравнения Стефана-Больцмана, в котором температуры определялись по показаниям термопар, установленных на экране и на поверхности трубы. Сигналы ГДТП фиксировались одновременно с показаниями термопар. Установлено, что вольт-ваттная чувствительность различных ГДТП составляла 110...190 мкВ/Вт.

Для монтажа ГДТП использовались доработанные вставки ЦКТИ. Один датчик размещался на лобовой части вставки, другой – со смещением на 45°. Оба ГДТП фиксировались на отфрезерованных в размер 8×10 мм площадках слоем высокотемпературного компаунда, закрывались слоем слюды и защитным экраном из стали

12X18Н9Т, приваренным по контуру (с помощью точечной сварки) к поверхности вставки. Коммутационные провода по технологической канавке доводились до тыльной образующей и далее выводились за теплоизоляцию котла по приваренной к вставке трубе.

Предварительные испытания ГГДТП, установленных в камере сгорания жаротрубно-дымогарного водогрейного котла ВТГ-80 тепловой мощностью 80 кВт, дали положительные результаты и показали, что методическая погрешность, вносимая термическим сопротивлением датчика и экрана, не превышает 1 %.

Еще одна серия экспериментов показала, что коэффициент эффективности плавника как ребра прямоугольного сечения во всех расчетных режимах составляет не менее 0,96, поэтому целесообразнее, в перспективе, монтировать ГГДТП не на трубах, а на плавниках – без нарушения герметичности системы, с возможностью замены датчика и т.д. (рис. 28).

Анализ условий облучения труб и плавников показал, что соотношение средней по экрану плотности теплового потока  $\bar{q}$  и плотности, измеренной на середине плавника  $q_{\max}$ , зависит от безразмерного шага труб  $S/d$ :

$$\frac{\bar{q}}{q_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\pi/2 - 1}{S/d}} \quad (11)$$

Учёт этой зависимости позволяет пересчитывать измеренные на середине плавника плотности теплового потока с помощью коэффициентов, зависящих от геометрических характеристик экранов топки и не зависящих от режима работы котла.

Промышленная часть эксперимента проведена на котле БКЗ-210-140ф (ст. № 9) ТЭЦ-4 г. Кирова.

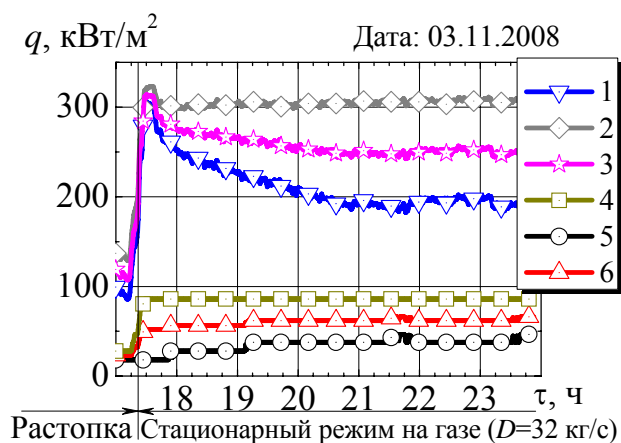
Паровой котел БКЗ-210 (номинальной паропроизводительностью  $D_n = 58,3$  кг/с, с параметрами перегретого пара: давлением  $p_{\text{пе}} = 13,8$  МПа и температурой  $t_{\text{пе}} = 540^\circ\text{C}$ ; тепловой мощностью  $Q_k = 143$  МВт) был модернизирован в 2008 г. и переведен на вихревую технологию сжигания трех видов топлива (кузнецкого каменного угля марки Г и Д, фрезерного торфа и природного газа). В процессе монтажа новой газоплотной топки в ее вихревой зоне активного горения были установлены предварительно отградуированные доработанные термовставки ЦКТИ с ГГДТП.

В ходе длительного эксперимента (более четырех месяцев) сопоставлены характеристики местной плотности теплового потока, полученные с помощью стандартной термовставки ЦКТИ и ГГДТП.

В этот период котел эксплуатировался в диапазоне паровых нагрузок  $(0,5 \dots 1,2)D_n$  на различных режимах (сочетаниях работающих пылесистем, гранулометрическом составе твердого топлива, воздушном балансе топки и др.) и трех указанных выше видах топлива. При этом тепловое напряжение топочного объема в указанном диапазоне нагрузок изменялось в пределах  $75 \dots 180$  кВт/м<sup>3</sup>, а средние значения плотности воспринятого стенами топки

теплового потока составили 72...155 кВт/м<sup>2</sup>.

Температура факела в вихревой зоне, измеренная оптическим пирометром, в зависимости от паровой нагрузки котла и сжигаемого топлива изменялась в пределах 1270...1670 К. В целом вихревая зона топки оказалась достаточно изотермичной (в отдельных режимах работы котла разница между максимальной и средней температурой факела не превышала 100 К).



**Рис. 29.** Изменение местной плотности теплового потока по данным измерений и расчетов:

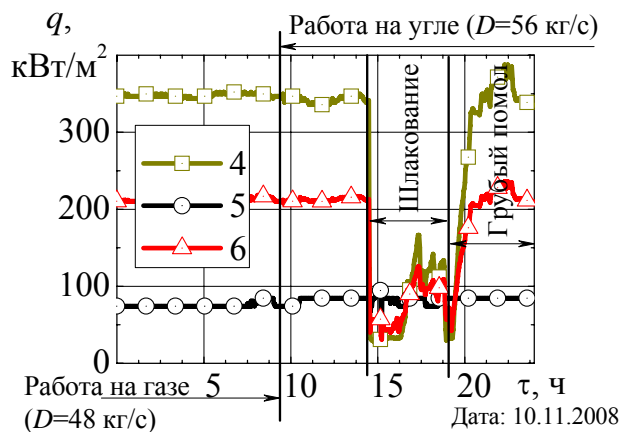
1 – термопара ЦКТИ №1; 2 – термопара ЦКТИ №2; 3 – среднее значение 1 и 2; 4 – лобовой ГГДТП; 5 – боковой ГГДТП; 6 – среднее значение 4 и 5

вых опытов показали, что значения местной плотности теплового потока, вычисленные по методике ЦКТИ, в 2,4...3,6 раз превышают средние значения по топке, в то время как значения, определенные по сигналу ГГДТП, дают превышение от среднего в пределах 1,2 раза. Последнее хорошо согласуется с известными литературными данными и физическими представлениями о закономерностях теплообмена в камерных топках.

При работе котла на твердом топливе установлено влияние загрязнения топочных экранов на показания ГГДТП. Например, в наладочных опытах увеличение доли вторичного воздуха в сочетании с утонением помола топлива приводило к повышению температурного максимума в зоне активного горения и интенсификации шлакования топочных экранов, о чем свидетельствовало резкое снижение сигнала ГГДТП (типичные кривые представлены на рис. 30). Снижение доли вторичного воздуха и особенно угрубление помола топлива способствовали понижению температуры в ядре горения и процессу самоочистки топочных экранов от загрязнений, о чем свидетельствовало повышение сигнала ГГДТП, и что также подтвердилось визуально.

Указанные факты показывают, что использование ГГДТП для определения воспринятого теплового потока оправдано. Данный метод качественно коррелирует с методикой ЦКТИ, однако есть основания полагать, что его результаты более точны и достоверны.

Полученные с помощью термовставок ЦКТИ и ГГДТП данные об изменении местной плотности теплового потока во времени представлены в виде графиков (рис. 29), из которых видно, что характер зависимостей качественно близок (за исключением термопары ЦКТИ № 1) и коррелирует с изменениями режима работы котла (периодами растопки и стационарной нагрузки). Однако при качественной корреляции, значения плотности теплового потока, вычисленные по методике ЦКТИ и по сигналу ГГДТП, отличаются на 200 кВт/м<sup>2</sup>. Оценки по результатам обработки балансовых опытов показали, что значения местной плотности теплового потока, вычисленные по методике ЦКТИ, в 2,4...3,6 раз превышают средние значения по топке, в то время как значения, определенные по сигналу ГГДТП, дают превышение от среднего в пределах 1,2 раза. Последнее хорошо согласуется с известными литературными данными и физическими представлениями о закономерностях теплообмена в камерных топках.



**Рис. 30.** Измерение плотности теплового потока при шлаковании термовставок (типичный пример). Обозначения кривых см. на рис. 29

Таким образом, в ходе промышленных экспериментов подтверждена работоспособность ГДТП на огневой поверхности топки и их высокая информативность. Показания датчиков соответствуют режимам и условиям работы котла. ГДТП можно считать средством диагностики шлакования.

Зная такие параметры экранов, как плотность воспринятого теплового потока и температуру поверхности, можно определить степень зашлакованности (загрязненности) топки или долю накопленной повреждаемости экранов. Другим практически важным применением для ГДТП может являться диагностика положения факела в топочном объеме: различному положению факела соответствуют различные значения падающих и воспринятых тепловых потоков на ограждающих стенах топки; таким образом, получив распределение воспринятых тепловых потоков по ширине и глубине топки, можно косвенно идентифицировать положение факела.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Показано, что градиентные датчики теплового потока (ГДТП), реализующие поперечный эффект Зеебека, имеют существенные преимущества перед аналогами, позволяющие использовать их при исследовании, оптимизации и эксплуатации промышленных теплоэнергетических установок.
2. Созданы принципиально новые гетерогенные датчики (ГДТП) на основе анизотропных слоистых композитов (включая газопроницаемые), в конструкции которых использованы металлы, сплавы и полупроводники. ГДТП обладают термостойкостью до 1300 К и выше, что делает их важным средством диагностики на теплоэнергетических объектах.
3. С единых позиций описано действие сплошных и слоистых (гетерогенных) ГДТП, что позволило аналитически оценить их чувствительность, определить оптимальное соотношение толщин и ориентацию слоев относительно вектора теплового потока.
4. Установлены соотношения в триаде «датчик-сигнал-аппаратура», позволяющие

Если судить о стабильности, то в период работоспособности датчиков каких-либо качественных изменений в показаниях зафиксировано не было. Отсутствует недостаток, присущий методике ЦКТИ: при «кажущейся» работе термопары, рассчитанная по ее показаниям плотность теплового потока принимает маловероятные значения.

Относительная погрешность градиентной теплотометрии в топке котельного агрегата составила 17%.

выбирать любой из трех компонентов сообразно условиям измерения, требованиям к его локальности и возможностями преобразовательного тракта.

5. Показано, что ГДТП являются многофункциональными первичными преобразователями, позволяющими, помимо теплового потока, измерять температуру (без дополнительных источников питания), расход и движение жидкости, касательные напряжения трения, а также служить датчиками при мониторинге электрических сетей.

6. Установлена аномально низкая ( $10^{-8} \dots 10^{-9}$  с) постоянная времени ГДТП, делающая их практически безынерционными при исследовании большинства тепловых процессов. Предложена физическая модель, адекватно описывающая работу ГДТП.

7. Опытами в ударных трубах подтверждена работоспособность ГДТП в существенно нестационарных условиях, установлено их надежное действие в присутствии электрических и магнитных полей.

8. Тестирование ГДТП в экспериментах, связанных с конвективным, радиационным и сложным теплообменом, показало хорошее совпадение результатов с надежными данными литературы; кроме того, выявлены новые возможности градиентной теплотметрии при оптимизации формы турбулизаторов и выборе режимов, интенсифицирующих теплообмен.

9. На основе ГДТП созданы макеты и опытные образцы устройств, предложенных для применения в теплоэнергетике и других областях техники: чувствительный элемент для индикации потоков излучения, расходомер и индикатор движения жидкости. ГДТП использованы как средство количественной диагностики на промышленных и энергетических объектах.

10. Впервые получена экспериментальная зависимость местной плотности теплового потока на стенке камеры сгорания дизельного двигателя от угла поворота коленчатого вала. Выявлено совпадение максимума плотности теплового потока с верхней мертвой точкой, показано влияние неравномерности впрыска топлива на плотность теплового потока в соседних циклах.

11. Предложена новая система теплотметрии в топках промышленных котельных агрегатов, исключая использование термовставок и нарушение герметичности пароводяного контура. Экспериментально доказана работоспособность ГДТП в условиях, близких к реально существующим в топках промышленных котлов.

12. Градиентная теплотметрия впервые успешно использована на котле БКЗ-210-140ф, установленном на ТЭЦ-4 г.Кирова. Показано, что такая система является средством диагностики шлакования теплообменных поверхностей.

#### ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

##### **Монографии:**

1. Сапожников, С.З. Градиентные датчики теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 168 с.
2. Митяков, В.Ю. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 203 с.

### **Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК:**

3. Сапожников, С.З. Теплометрия в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с использованием градиентных датчиков теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Энергетика.– 1997.– № 9–10.– С. 53–57.– (Изв. высш. учеб. заведений).
4. Митяков, А.В. Использование поперечного эффекта Зеебека для измерения мгновенного значения теплового потока на вертикальной нагретой поверхности в условиях свободноконвективного теплообмена / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, Ю.С. Чумаков // Теплофизика высоких температур.– 2002.– Т. 40.– № 4.– С. 669–674.
5. Баранов, П.А. Физическое и численное моделирование вихревого теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки на плоскости / П.А. Баранов, С.А. Исаев, А.И. Леонтьев, А.В. Митяков [и др.] // Теплофизика и аэромеханика.– 2002.– Т. 9.– № 4.– С. 521–532.
6. Леонтьев, А.И. Интенсификация смерчевого турбулентного теплообмена в асимметричных лунках на плоской стенке / А.И. Леонтьев, С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // Инженерно-физический журнал.– 2003.– Т. 76.– № 2.– С. 24–31.
7. Сапожников, С.З. Измерение теплового потока на внутренних стенках канала ударной трубы / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.В. Бобашев [и др.] // ПЖТФ.– 2004.– Т. 30.– Вып. 2.– С. 76–80.
8. Сапожников, С.З. Градиентные датчики теплового потока в теплофизическом эксперименте / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Теплофизика высоких температур.– 2004.– Т. 42.– № 4. С. 626–634.
9. Сапожников, С.З. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Журнал технической физики.– 2004.– Т. 74.– № 7.– С. 114–120.
10. Бобашев, С.В. Тепловые измерения на поверхности тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком азота / С.В. Бобашев, Н.П. Менде, С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // Письма в Журнал Технической Физики.– 2006.– Т. 32.– Вып. 14.– С. 46–51.
11. Митяков, В.Ю. Местные тепловые потоки на поверхностях лунок, траншей и каверн / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников, С.А. Исаев // Теплоэнергетика.– 2007.– № 3.– С. 29–32.
12. Митяков, В.Ю. Градиентные датчики для высокотемпературной теплометрии / В.Ю. Митяков, С.А. Можайский, С.З. Сапожников, А.В. Митяков // Письма в Журнал Технической Физики.– 2008.– Т. 34.– Вып. 19.– С. 1–5.
13. Менде, Н.П. Применение градиентного датчика теплового потока в исследованиях импульсных процессов на ударной трубе / Н.П. Менде, В.А. Сахаров, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков [и др.] // Журнал технической физики.– 2008.– Т. 78.– Вып. 12.– С. 103–104.
14. Бобашев, С.В. Использование анизотропных датчиков теплового потока в аэродинамическом эксперименте / С.В. Бобашев, В.А. Сахаров, С.З. Сапожников,

А.В. Митяков [и др.] // Письма в Журнал Технической Физики.– 2009.– Т. 35.– Вып. 5.– С. 36–42.

15. Митяков, А.В. Градиентная теплотметрия: возможности и перспективы / А.В. Митяков // Промышленная энергетика.– 2009.– № 2.– С. 31–34.
16. Сапожников, С.З. Состояние и перспективы развития градиентной теплотметрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.А. Можайский // Теплоэнергетика.– 2009.– № 3.– С. 2–11.– Пер. ст.: Sapozhnikov, S.Z. State and Prospects of Development of Gradient Calorimetry / S.Z. Sapozhnikov, V.Yu. Mityakov, A.V. Mityakov, S.A. Mozhaishkii // Thermal Engineering.– 2009.– Vol. 56.– No. 3. P. 181–190.
17. Митяков, А.В. Градиентные датчики теплового потока в физическом и промышленном эксперименте / А.В. Митяков // Приборостроение.– 2009.– № 7.– С. 75–81.

#### **Патенты:**

18. Патент на полезную модель 75467 РФ. Датчик теплового потока (варианты) / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников. Заявка № 2007137839 от 04.10.2007. Зарег. 10.08.2008.

#### **Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов:**

19. Сапожников, С.З. Теплотметрия в энергетике и экологии: использование градиентных датчиков / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Фундаментальные исследования в технических университетах: тез. докл. науч.-техн. конф. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. – С. 192.
20. Митяков, А.В. Изучение радиационно-конвективных тепловых потоков с помощью градиентных датчиков / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // II Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т. 6. – С. 331–334.
21. Сапожников, С.З. Математическая модель и экспериментальное исследование датчика излучения в оптическом диапазоне длин волн / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Наука Кубани. Проблемы физико-математического моделирования. Естественные и технические науки. – 1998. – №2. – С. 17–21.
22. Sapozhnikov, S.Z. Heat Flux Sensor For Heat Transfer Investigation / S.Z. Sapozhnikov, V.Y. Mitiakov, A.V. Mitiakov // 11-th International Heat Transfer Conference. – Kyongju, Korea, 1998. – Vol. 4. – P. 77–79.
23. Митяков, А.В. Математическая модель чувствительного элемента для детектора излучения / А.В. Митяков // Вестник молодых ученых. Серия: Технические науки. – СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. – №1. С.4–11.
24. Митяков, В.Ю. Использование градиентных датчиков теплового потока для исследования местной теплоотдачи при поперечном обтекании цилиндра / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников // XII Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – Т. 1. – С.47–50.
25. Сапожников, С.З. Локальный теплообмен при вынужденной конвекции в сферической лунке / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // IV Минский международный форум по теплообмену. – Минск, 2000. С.479–482.



26. Mitiakov, V. Local Heat Transfer In The Spherical Cavity At The Forced Convection / V. Mitiakov, S. Sapozhnikov, A. Mitiakov // 3-rd European Thermal Sciences Conference 2000. – Heidelberg, Germany, 2000. – Vol. 2. – P. 671–674.
27. Mitiakov, V. Transient Phenomena In Gradient Heat Flux Sensor / V. Mitiakov, S. Sapozhnikov, A. Mitiakov // 3-rd European Thermal Sciences Conference 2000. – Heidelberg, Germany, 2000. – Vol. 2. – P. 687–690.
28. Sapozhnikov, S. Experimental Investigation Of The Convective Heat Transfer Using Gradient Heat Flux Sensors / S. Sapozhnikov, V. Mitiakov, A. Mitiakov, Y. Chumakov // 5th World Conference on Experimental Heat Transfer. Fluid Mechanics and Thermodynamics. – Thessaloniki, Greece, 2001. – Vol. 2. – P. 1111–1116.
29. Леонтьев, А.И. Местные коэффициенты теплоотдачи на поверхности вытянутой лунки / А.И. Леонтьев, С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // Тр. III Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2002. – Т.6. – С.114–117.
30. Митяков, А.В. Определение радиационных и теплофизических характеристик материалов методами градиентной теплотметрии / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // Тр. XXVI Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2002.
31. Сапожников, С.З. Возможности градиентных датчиков при измерении тепловых потоков, температур касательных напряжений трения / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Тр. XXVI Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2002.
32. Сапожников, С.З. Возможности градиентной теплотметрии при изучении локального теплообмена в камерах сгорания ДВС / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Тр. III Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2002. – Т.1. – С.215–218.
33. Митяков, В.Ю. Градиентные датчики теплового потока в корреляционной расходомерии / В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.З. Сапожников // XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – Т.1. – С.417–420.
34. Блинов, М.А. Экспериментальное исследование течения и теплообмена при свободной и смешанной конвекции воздуха в вертикальной круглой трубе / М.А. Блинов, М.Е. Лебедев, Б.С. Фокин, А.В. Митяков [и др.] // XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: МЭИ, 2003. – Т.2. – С.214–218.
35. Sapozhnikov, S. Capabilities Of Gradient Sensors In The Measurement Of The Heat Fluxes, Temperatures, Tangential Stresses, And Thermophysical Characteristics Of Materials / S. Sapozhnikov, V. Mitiakov, A. Mitiakov // Journal of Engineering Thermophysics. – 2003. – Vol. 12. – №1. – P. 49–71.
36. Бобашев, С.В. Применение градиентного датчика теплового потока в экспериментах на ударной трубе / С.В. Бобашев, Н.П. Менде, А.В. Митяков [и др.] // Фундаментальные проблемы высокоскоростных течений: тр. междунар. конф. – М., 2004.
37. Бобашев, С.В. Возможности градиентных датчиков при исследовании процессов в ударных трубах / С.В. Бобашев, Н.П. Менде, С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // Тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2004.

38. Сапожников, С.В. Динамические характеристики градиентных датчиков теплового потока / С.З. Сапожников, А.В. Митяков, В.А. Сахаров [и др.] // Тр. XXVII Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2004.
39. Сапожников, С.З. Градиентная теплометрия в теплотехническом эксперименте / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Труды СПбГПУ №491. Энергомашиностроение. – СПб: Изд-во политехнического ун-та, 2004. С.34–47.
40. Сапожников, С.З. Градиентная теплометрия и её возможности в теплотехническом эксперименте / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб, 2004.
41. Митяков, А.В. Натурная градиентная теплометрия в ударных трубах / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // XV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: МЭИ, 2005. – Т. 1. – С.368–371.
42. Можайский, С.А. Градиентная теплометрия при мониторинге электрических сетей переменного тока / С.А. Можайский, А.В. Митяков [и др.] // XV Школа-семинар молодых ученых и специалистов. – М.: МЭИ, 2005. – Т. 1. – С.372–374.
43. Сапожников, С.З. Экспериментальное исследование теплообмена в «Трубе Леонтьева» / С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // Тр. XXVIII Сибирского теплофизического семинара. Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск, 2005.
44. Митяков, А.В. Теплометрия в кавернах и задачи нестационарного теплообмена / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников // II Рос. конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». – М., 2005.
45. Митяков, А.В. Градиентная теплометрия в сверхзвуковых потоках газоразрядной плазмы / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, В.А. Сахаров [и др.] // Тр. IV Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2006. – Т. 1. – С.194–197.
46. Митяков, А.В. Теплометрия в ударных трубах: возможности при исследовании теплообмена в газовых потоках / А.В. Митяков, С.З. Сапожников, Н.П. Менде [и др.] // Тр. IV Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2006. – Т. 8. – С.87–89.
47. Митяков, А.В. Экспериментальное исследование процессов газодинамического энергоразделения в устройстве типа «гарпун Леонтьева» / А.В. Митяков, С.А. Можайский // Материалы конф. Политехнического симпозиума. – СПб., 2006.
48. Митяков, А.В. Экспериментальное исследование теплообмена на поверхности сферической лунки / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков // Тр. VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева. – 2007. – Т. 2. – С.509–511.
49. Сапожников, С.З. Градиентная теплометрия в ДВС: возможности и перспективы / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Сб. науч. тр. по материалам междунар. конф. Двигатель-2007, посвященной 100-летию школы двигателестроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2007 – С.551–556.
50. Сапожников, С.З. Тестирование и использование градиентных датчиков теплового потока / С.З. Сапожников, В.И. Терехов, А.В. Митяков [и др.] // Материалы V Балтийской конференции по теплообмену. – СПб., 2007. – С.567–568.
51. Баранов, П.А. Методическое численно-экспериментальное исследование турбу-

- лентного течения и теплообмена около пластины со сферической лункой / П.А. Баранов, С.А. Исаев, С.З. Сапожников, А.В. Митяков [и др.] // III междунар. конф. «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 21-23 октября 2008 г. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – С.115–116.
52. Сапожников, С.З. Исследование локального переноса тепла: уникальные возможности градиентных датчиков / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // VI Минский международный форум по тепломассообмену. – Минск, 2008. – Т. 2. – С.375–377.
53. Сапожников, С.З. Определение теплофизических свойств с использованием градиентных датчиков теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков // Тез. докл. XII российской конференции по Теплофизическим свойствам веществ. М.: Интерконтакт Наука, 2008 – С.37–38.
54. Сапожников, С.З. Градиентные датчики теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.А. Можайский // Тез. докл. XII российской конференции по Теплофизическим свойствам веществ. М.: Интерконтакт Наука, 2008– С.73–74.
55. Исаев, С.А. Моделирование нестационарного турбулентного течения и теплообмена около пластинки со сферической лункой / С.А. Исаев, А.В. Митяков [и др.] // Тр. XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25-29 мая 2009 г. – Жуковский. В 2 т. – Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 64–67.
56. Митяков, А.В. Гетерогенные градиентные датчики теплового потока / А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.А. Можайский, С.З. Сапожников // Тр. XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». 25-29 мая 2009 г. – Жуковский. В 2 т. – Т.1. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – С. 128–130.
57. Митяков, А.В. Измерение тепловых потоков при высоких температурах: инновационные датчики теплового потока / А.В. Митяков // Материалы междунар. молодежного форума «Будущее высоких технологий и инноваций за молодой Россией» в рамках XV международной выставки-конгресса «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» – Рыбинск, РГАТА, 2009. – С.26–29.