



*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 536.2.08

Д.М. Маркович<sup>1</sup>, А.С. Небучинов<sup>1</sup>, А.А. Гусаков<sup>2</sup>, А.В. Митяков<sup>2</sup>, В.Ю. Митяков<sup>2</sup>,  
С.А. Можайский<sup>2</sup>, С.З. Сапожников<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт теплофизики СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр-т. ак. Лаврентьева, 1*

<sup>2</sup> *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
Санкт-Петербург, 195251, ул. Политехническая, д. 29*

## **ВОЗМОЖНОСТИ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ PIV И ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ**

### **АННОТАЦИЯ**

Предложен новый метод исследования теплообмена, основанный на совместном использовании PIV-диагностики и градиентной теплотометрии. Одновременное использование измерительного комплекса ПОЛИС и градиентных датчиков теплового потока позволяет отслеживать пульсации теплового потока при изменении скорости и турбулентности потока среды. Представлены первые результаты экспериментальных исследований полей скорости и теплового потока при обтекании воздухом нагретой лунки.

**ПОЛЕ СКОРОСТИ, ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК, НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ, ЛУНКА**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Изучение теплообмена и течения до сих пор выполнялось в ходе достаточно сложных отдельных экспериментов. Если методика и аппаратура для экспериментального исследования течений весьма разнообразны и широко апробированы, то исследования нестационарного теплообмена на изотермических поверхностях тормозилось отсутствием датчиков теплового потока с необходимым быстродействием.

Появление в 90-х гг. прошлого века градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) навело на мысль совместить исследование течения и теплообмена в одном опыте.

Предлагается новый метод исследования теплообмена, основанный на совместном использовании PIV – диагностики [1] и градиентной теплотометрии [2]. Бесконтактный оптический метод измерения полей скорости методом PIV позволяет изучить нестационарное течение, а одновременное применение градиентной теплотометрии даёт информацию о плотности местных тепловых потоков в режиме реального времени, при этом удаётся связать параметры течения (включая турбулентность) с колебаниями плотности теплового потока.

### **ГРАДИЕНТНЫЕ ДАТЧИКИ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОКА (ГДТП)**

Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека [3]: при протекании теплового потока через пластину с анизотропией теплофизических и термоэлектрических свойств в направлении, нормальном вектору теплового потока, возникает термоЭДС,

пропорциональная величине теплового потока, и меняющая знак при изменении его направления (рис. 1).

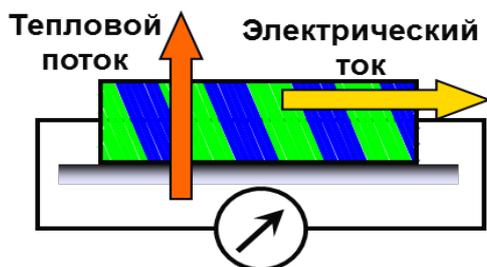


Рис. 1. Принцип действия ГДТП

ГДТП из природных материалов (висмута и др.) и косослойных композитов, изготовленные в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (рис. 2), прошли многочисленные испытания, в том числе успешно применялись для исследования конвективного теплообмена [4].

Особо интересен тот факт, что при нестационарном тепловом воздействии поперечная термоЭДС формируется в поверхностном слое анизотропного материала. Постоянная времени всех исследованных до настоящего времени ГДТП имеет порядок  $10^{-9} \dots 10^{-8}$  с. Это позволяет считать ГДТП безынерционным средством измерения для большинства процессов теплообмена.

В опытах, описанных ниже, использовались ГДТП (рис 2. а, б), представляющие собой батареи анизотропных термоэлементов [2]. Анизотропные термоэлементы, выполненные из монокристаллического анизотропного висмута чистотой 0,9999, скоммутированы висмутом, используемым как припой. ГДТП изготовлены в лаборатории кафедры «Теоретические основы теплотехники»; их вольт-ваттная чувствительность составляет  $5 \div 20$  мВ/Вт и зависит от плотности укладки термоэлементов.

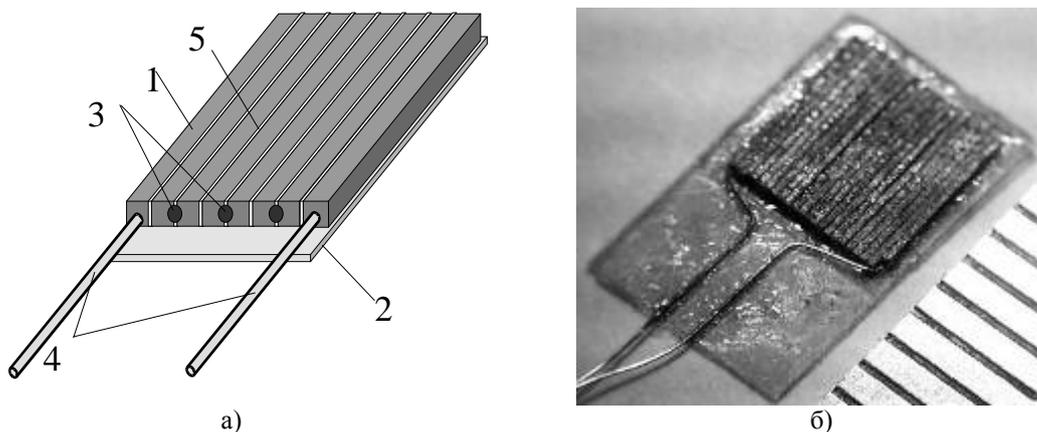


Рис. 2. Схема (а) и общий вид (б) ГДТП на основе висмута (шкала в мм): 1 – анизотропный термоэлемент; 2 – подложка из слюды; 3 – спаи из чистого висмута; 4 – токовыводы; 5 – лавсановые прокладки

## PIV – ДИАГНОСТИКА И КОМПЛЕКС ПОЛИС

В основе двумерной реализации PIV-метода (рис. 3) заложено измерение смещения помещённых в поток частиц (трассеров) за известный интервал времени. Результатом являются мгновенные двухкомпонентные поля скорости в измерительной плоскости,

создаваемой лазерным ножом. Размер, плотность и объёмная концентрация частиц подбирают таким образом, чтобы эффекты, связанные с влиянием второй фазы на поток, и влияние сил плавучести были минимальными. Кроме этого, важным параметром является оптическая прозрачность среды. В потоках воздуха используют, как правило, дым, мелкие капли различных жидкостей (около 1 мкм), распыляемые генераторами аэрозоля.

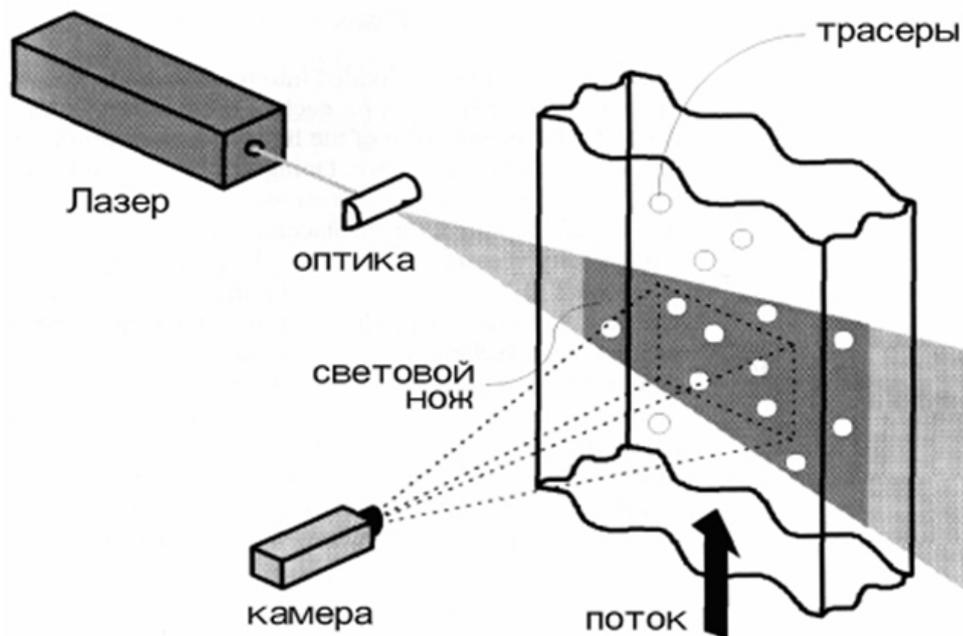


Рис. 3. Схема метода PIV

Частицы в измерительной плоскости потока должны быть освещены, как минимум, дважды. В качестве источника освещения обычно используются импульсные лазеры. Пучок света от лазера при помощи специальной системы оптических линз преобразуется в световое поле (“нож”) толщиной от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Временная задержка между вспышками источника подбирается в зависимости от скорости потока и размеров измерительной области. Вспышка источника создаёт стробоскопический эффект в измерительной плоскости потока. Свет, отражённый частицами, попавшими в освещённую область, записывают либо на один кадр, либо на последовательность кадров изображения. С появлением цифровых камер с высоким разрешением и малым временем экспозиции, изображения оцифровывают непосредственно на ПЗС-матрице камеры и передают для хранения на жёсткий диск компьютера в виде файлов в графическом формате.

Основным элементом PIV-методики является обработка полученных изображений. Для получения сдвигов частиц используют корреляционные методы обработки изображений. Значительная неопределённость результатов измерений возникает при измерении скоростей потоков с большими градиентами скорости, когда внутри одной элементарной области разные частицы совершают разные перемещения. В этом случае на корреляционной функции возникают несколько пиков, соответствующих перемещениям разных частиц. Для минимизации неопределённости следует придерживаться общепринятых рекомендаций:

- Размер частиц на изображении должен быть около 1,5...2,0 пикселя.
- Эффективное количество частиц с учётом эффекта «потери пары» в элементарной области  $N_f > 5$  для кросскорреляционных алгоритмов и  $N_f > 8$  для автокорреляционных.
- Максимальное измеряемое смещение частиц  $L_{max} < 1/4$  области расчёта.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает в себя аэродинамическую трубу, модель объекта, измерительный комплекс ПОЛИС, ГДП, светолучевой осциллограф, парогенератор и дымогенератор.

Измерительная система ПОЛИС в конфигурации 2D состоит из блока синхронизации, лазера и цифровой камеры. Управление экспериментом и обработка данных осуществляется с использованием специального пакета программного обеспечения «ActualFlow».

Для возможности проведения измерений полей скорости внутри лунки камера была установлена под углом  $8^\circ$  к плоскости пластины.

Аэродинамическая труба кафедры «Теоретические основы теплотехники» СПбГПУ (рис. 4, 5) – открытого типа, с камерой Эйфеля. Стенки камеры выполнены из оптически прозрачного материала для возможности измерений полей скорости методом PIV.

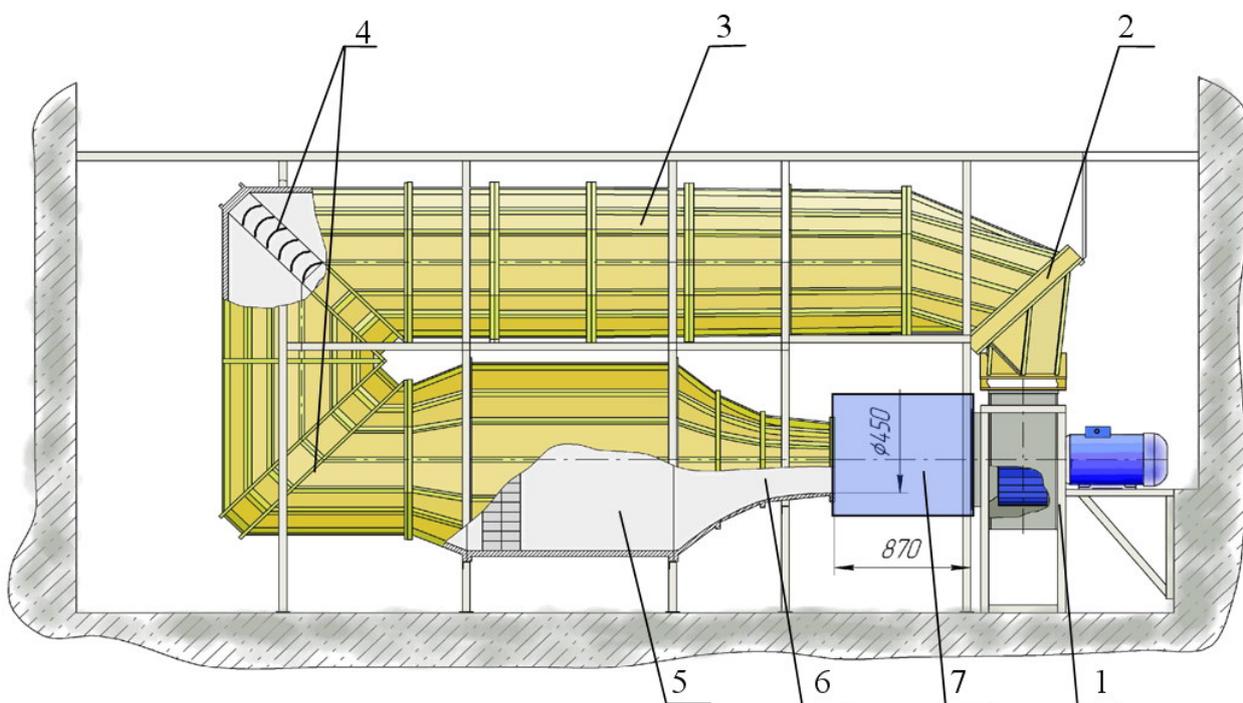


Рис. 4. Аэродинамическая труба кафедры ТОТ СПбГПУ (схема):

1 – центробежный вентилятор, 2 – теплообменник, 3 – обратный канал, 4 – повороты с лопатками, 5 – форкамера с хонейкомбом, 6 – конфузор (коллектор), 7 – камера Эйфеля

Особенностью стенда является возможность вести измерения, начиная с режима свободно-конвективного теплообмена и далее – при скоростях потока от  $0,1 \dots 1,0$  м/с до  $40 \dots 50$  м/с. Такой диапазон скоростей обеспечен глубоким регулированием частоты вращения вентилятора, а также рядом «ноу хау», обеспечивающих уровень турбулентности не выше  $0,3\%$  во всем диапазоне скоростей потока.

Температура воздушного потока стабилизируется специальным теплообменником и может поддерживаться на уровне  $15 \dots 30$  °С с точностью  $\pm 0,1$  °С.



Рис. 5. Аэродинамическая трубы кафедры ТОТ СПбГПУ (общий вид)

В качестве модели используется сферическая лунка относительной глубины  $h/d = 0,1$  (при диаметре  $d=62$  мм) на поверхности выполненной из латунного и медного листа толщиной  $0,2...0,4$  мм коробчатой конструкции, обогреваемой насыщенным паром с температурой близкой к  $100^{\circ}\text{C}$  (рис. 6). Нерабочие поверхности модели теплоизолированы, пар подаётся от электрического парогенератора-кипятильника.

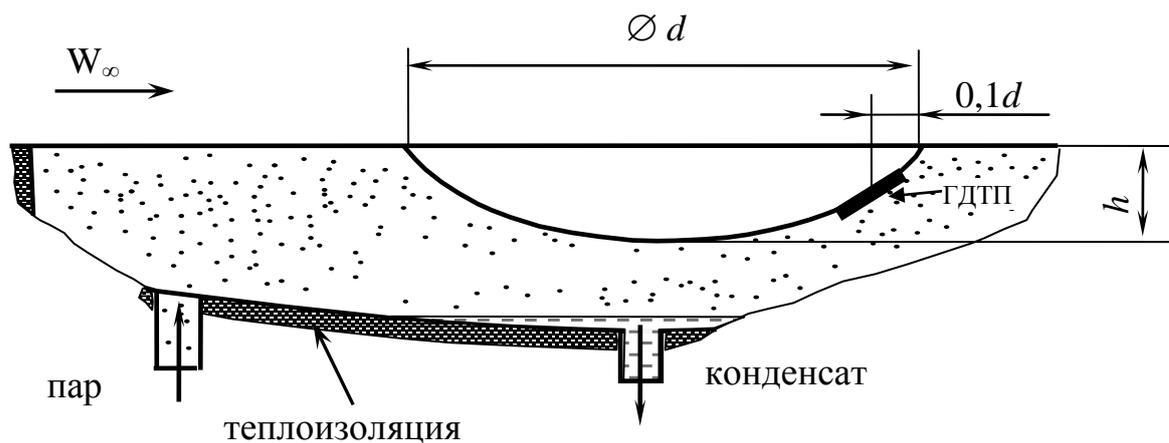


Рис. 6. Обогреваемая модель лунки с ГДТП

Для измерения плотности локального теплового потока на поверхности лунки фиксируется ГДТП (Рис. 6) толщиной около  $0,2$  мм и с размерами в плане  $4 \times 7$  мм и чувствительностью  $S_0=8,4$  мВ/Вт. Датчик устанавливался в центральном сечении на расстоянии  $0,9d$  от передней кромки лунки. ГДТП совместно с гальванометром

светолучевого осциллографа Н-145 отградуирован по специально разработанной методике [2].

Нагретая паром модель лунки обдувается воздухом в камере Эйфеля, которая обеспечивает постоянную концентрацию трассеров. Поток засеивается частицами с помощью дымогенератора; средний диаметр частиц составляет 2 мкм. Измерения проводятся после достижения необходимой концентрации и равномерного распределения частиц.

«Стандартный дым», полученный из поставляемого с системой ПОЛИС дымогенератора фирмы Safex-chemie (модель F-2010 Plus), состоит из капель жидкости safex-inside-nebelfluide размером 1...5 мкм. Вблизи нагретой поверхности эти капли испаряются, и визуализировать поле скорости не удаётся. Используемый в наших экспериментах дымарь пасечника (рис. 7) позволил получить приемлемый результат.



Рис. 7. Дымарь пасечника

Для борьбы с бликами от лазерного луча поверхность лунки была обработана смесью индустриального масла, спирта и флуоресцентного красителя «Родамин Ж», который при отражении менял длину волны падающего луча. Отражённый свет фильтровался узкополосным зелёным фильтром.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

В этом разделе представлены результаты, полученные в ходе первых экспериментов. С помощью дыма (рис. 8, 9) показаны фотография характерного течения в продольном центральном сечении лунки (а), соответствующие мгновенные поля скорости (б) и завихренности (в); одновременно и непрерывно измерялась местная плотность теплового потока.

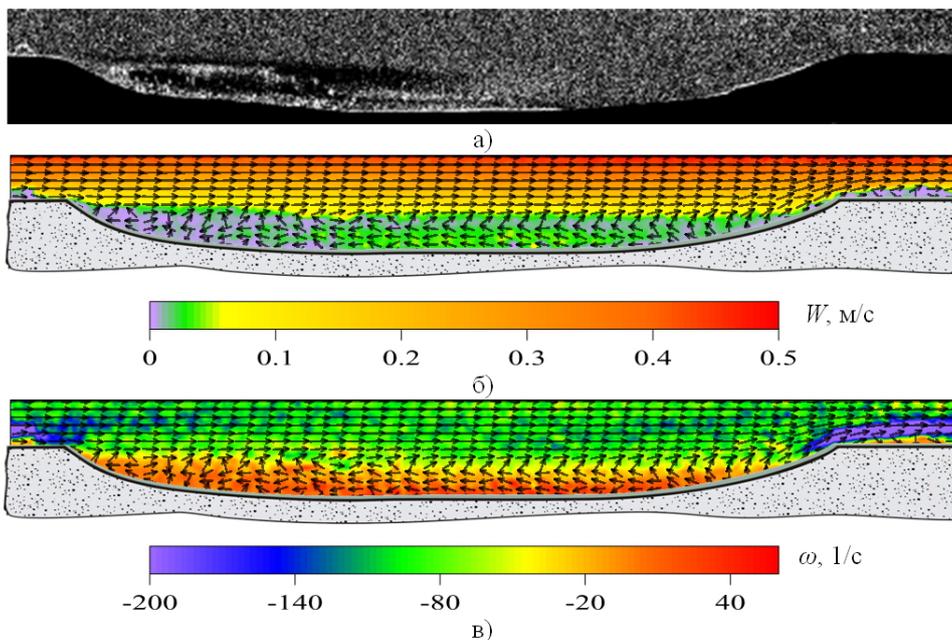


Рис. 8. Фотография характерного течения (а), мгновенное поле скорости (б), мгновенное поле завихренности (в) при  $W_\infty=0,5$  м/с

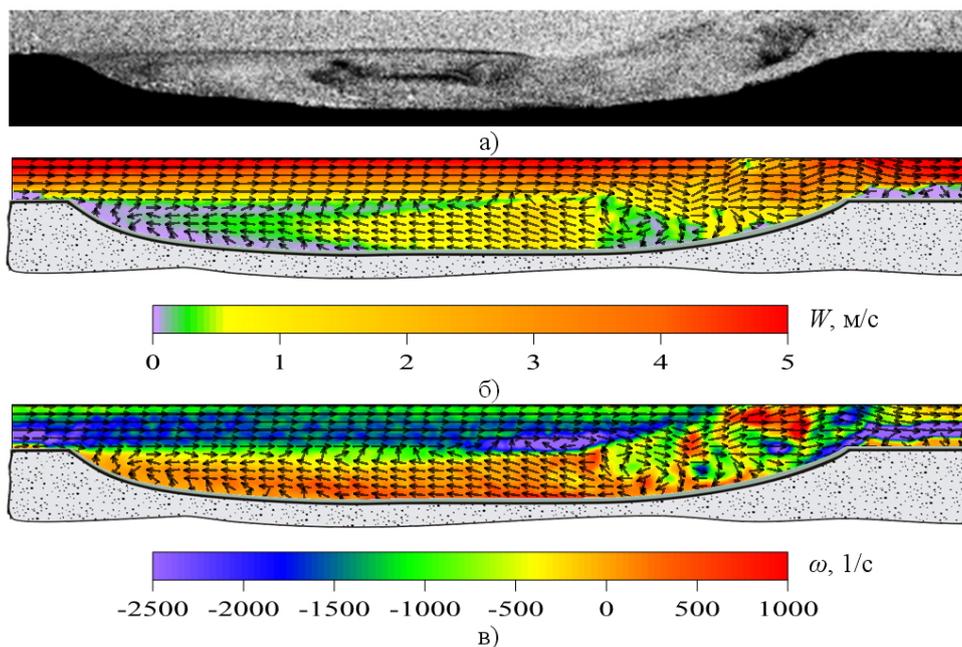


Рис. 9. Фотография характерного течения (а), мгновенное поле скорости (б), мгновенное поле завихренности (в) при  $W_\infty=5$  м/с

Зависимость плотности теплового потока от времени мы назвали, по аналогии с общепринятым термином «временная термограмма», «временной термограммой» (рис.10, 13).

При скорости набегающего потока  $W_\infty=0,5$  м/с в момент, соответствующий максимуму плотности теплового потока, зафиксирован достаточно сильный обратный ток (рис. 11 а), а при минимуме плотности теплового потока обратный ток наблюдался лишь в небольшой зоне по центру лунки (рис. 12 а), соответственно ведут себя и завихренности (рис. 11 б, 12 б).

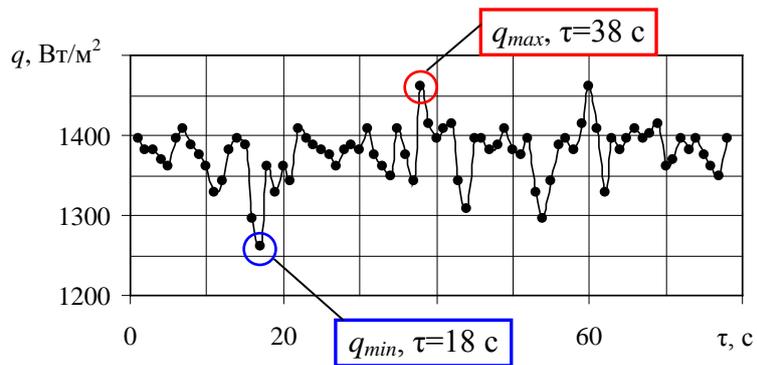


Рис. 10. Временная теплограмма при средней скорости потока  $W_\infty = 0,5$  м/с

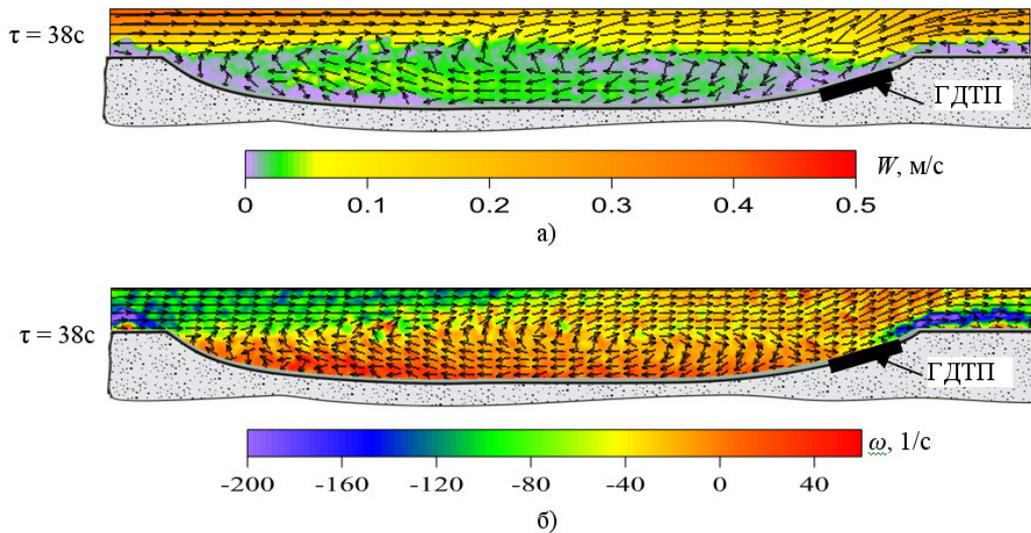


Рис. 11. Мгновенные поля скорости (а) и завихренности (б) при максимуме плотности теплового потока  $q$  ( $\tau = 38$ с). Средняя скорость потока  $W_\infty = 0,5$  м/с

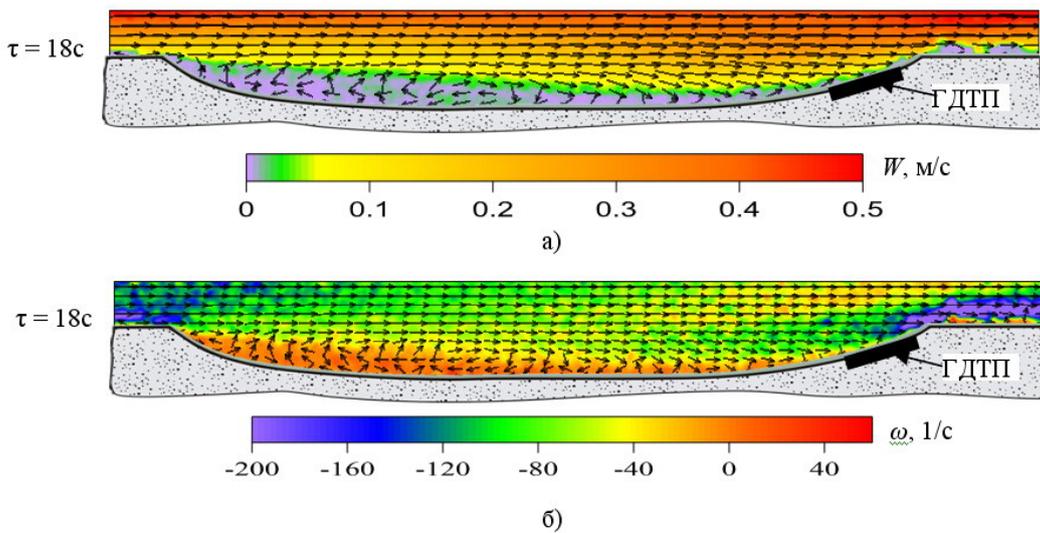


Рис. 12. Мгновенные поля скорости (а) и завихренности (б) при минимуме плотности теплового потока  $q$  ( $\tau = 18$ с). Средняя скорость потока  $W_\infty = 0,5$  м/с

При скорости набегающего потока  $W_\infty = 5$  м/с наблюдается подобная картина, но обратные токи становятся более мощными (рис. 14 а, 15 а), и средняя плотность теплового потока возрастает (рис. 14 б, 15 б).

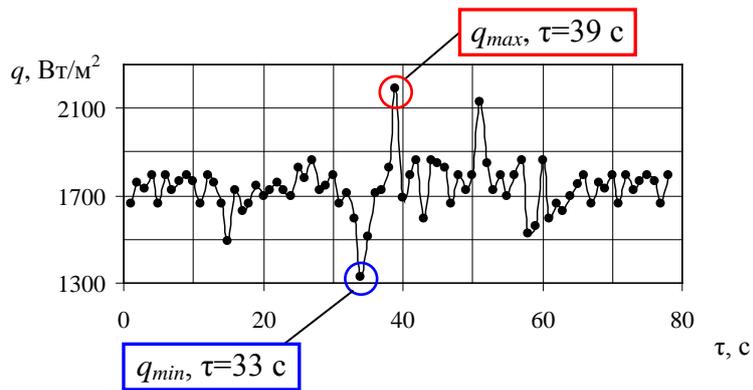


Рис. 13. Временная теплограмма при средней скорости потока  $W_\infty = 5$  м/с

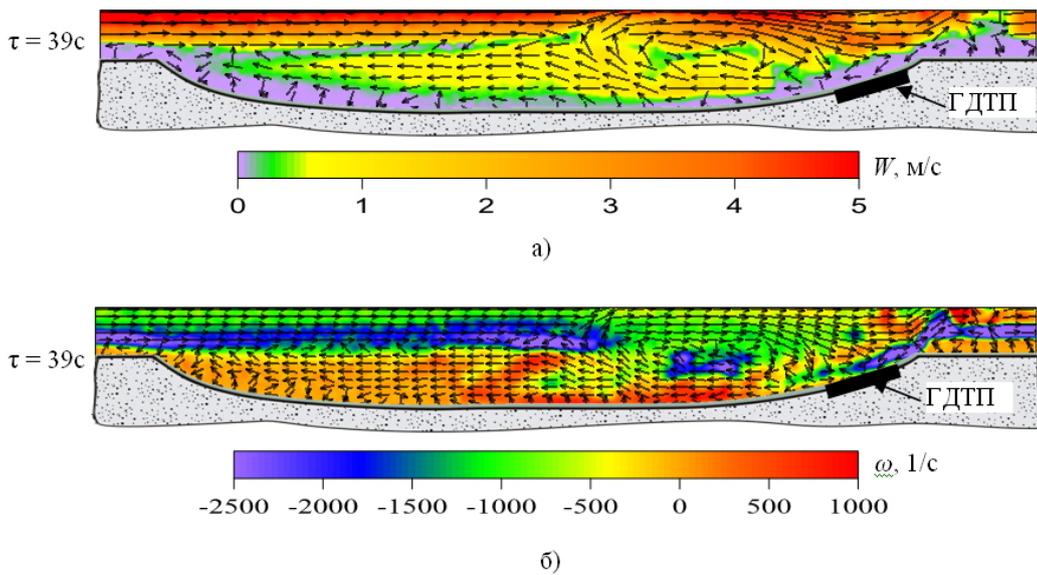


Рис. 14. Мгновенные поля скорости (а) и завихренности (б) при максимуме плотности теплового потока  $q$  ( $\tau = 39$ с). Средняя скорость потока  $W_\infty = 5$  м/с

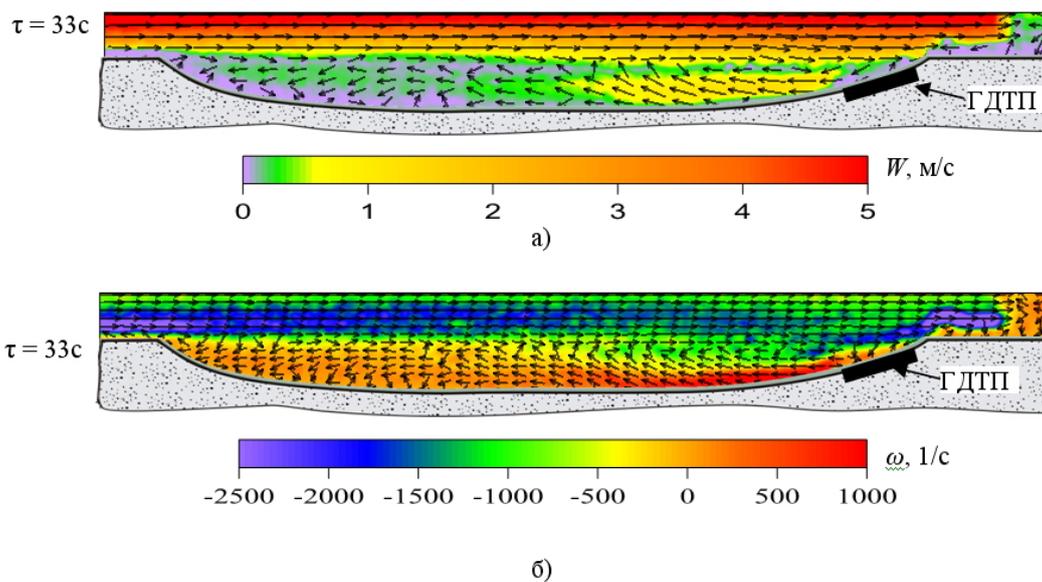


Рис. 15. Мгновенные поля скорости (а) и завихренности (б) при минимуме плотности теплового потока  $q$  ( $\tau = 33$ с). Средняя скорость потока  $W_\infty = 5$  м/с

Ранее получено [2] распределение относительного теплового потока по поверхности нагретой лунки при скорости набегающего потока  $W_\infty = 0,5$  м/с (рис. 15 б) и  $W_\infty = 5$  м/с (рис. 16 б). Ниже показано распределение относительной плотности теплового потока на поверхности лунки и соответствующее поле средней скорости в продольном центральном сечении лунки при  $W_\infty = 0,5$  м/с (рис.15 а) и  $W_\infty = 5$  м/с (рис.16 а).

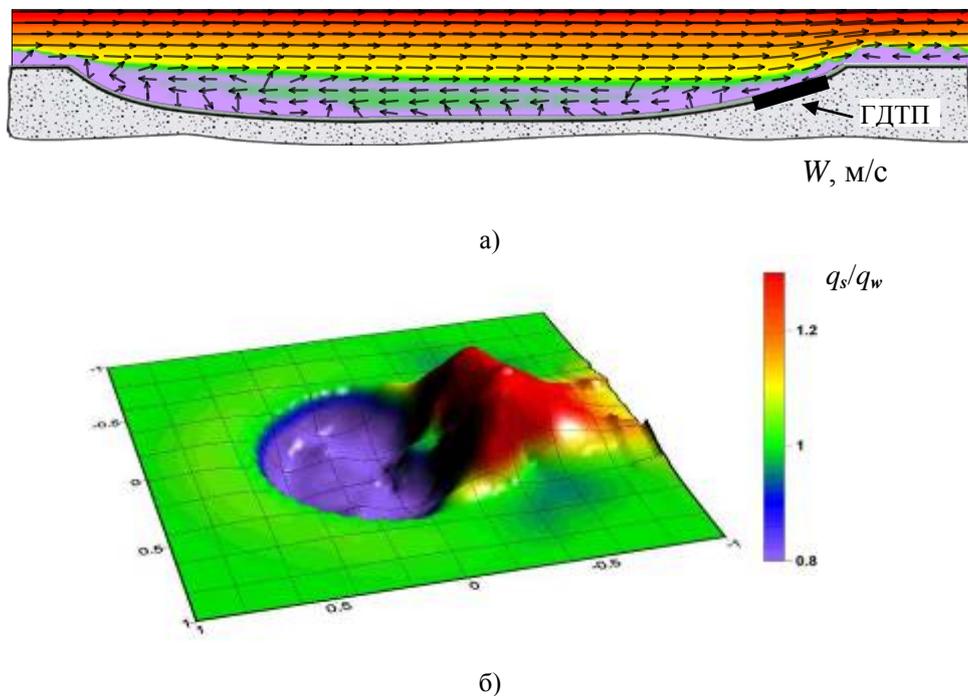


Рис. 16. Поле средней скорости в продольном центральном сечении лунки (а) и распределение относительного теплового потока на поверхности лунки (б) при  $W_\infty = 0,5$  м/с. индекс «s» относится к величинам, измеряемым на поверхности лунки, индекс «w» – на плоскости

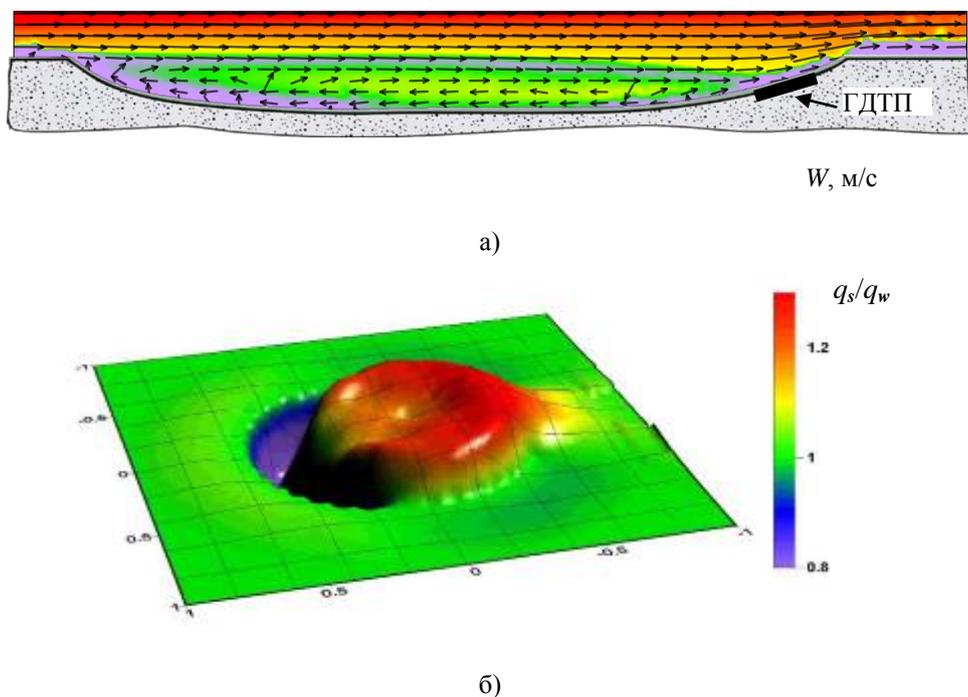


Рис. 17. Поле средней скорости в продольном центральном сечении лунки (а) и распределение относительного теплового потока на поверхности лунки (б) при  $W_\infty = 5$  м/с; индекс «s» относится к величинам, измеряемым на поверхности лунки, индекс «w» – на плоскости вдали от лунки

## ВЫВОДЫ

С помощью PIV-метода и градиентной теплотметрии удалось исследовать динамические тепловые характеристики и структуру воздушных вихрей, образующихся внутри нагретой лунки. В результате одновременных измерений теплового потока и мгновенного поля скорости получена связь местной плотности теплового потока с полем скорости. Визуализация поля скорости показала сложную структуру вихревых образований в продольном сечении лунки.

Результаты первых опытов показали, что предложенный метод возможно использовать в теплотехническом эксперименте.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$d$  – диаметр лунки, мм;

$h$  – глубина лунки, мм;

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$S_0$  – вольт-ваттная чувствительность датчика, мВ/Вт;

$\tau$  – время, с.

$W$  – скорость потока, м/с;

$\omega$  – завихренность, 1/с.

Индексы:

$s$  – относится к величинам, измеряемым на поверхности лунки;

$w$  – относится к величинам, измеряемым на плоскости вдали от лунки;

$\infty$  – относится к внешнему потоку.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «ПОЛИС» измеритель полей скорости [Электронный ресурс] /Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск. - Режим доступа: <http://www/itp.nsc.ru/piv/piv.htm>
2. Сапожников С.З. Основы градиентной теплотметрии / С.З.Сапожников, В.Ю.Митяков, А.В. Митяков. – СПб.:Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 203 с.
3. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока: Изд-во СПбГПУ, 2003. 168 с.
4. 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.

D.M. Markovich<sup>1</sup>, A.S. Nebuchinov<sup>1</sup>, A.A. Gusakov<sup>2</sup>, A.V. Mityakov<sup>2</sup>, V.Yu. Mityakov,<sup>2</sup>  
S.A. Mozhayskiy<sup>2</sup>, S.Z. Sapozhnikov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Thermophysics SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Lavrentyev Ave., 1*  
*E-mail: dmark@itp.nsc.ru*

<sup>2</sup>*St.Petersburg State Polytechnical University, Russia, 195251, St.Petersburg,*  
*Polytechnicheskaya St., 29*

## **COMBINED PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AND GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENTS FOR A FLOW PAST A HEATED ISOTHERMAL SURFACE**

*A new method for heat transfer studies is proposed as a combination of PIV and heat flux measurements. POLIS PIV system coupled with gradient heat flux sensors is used to monitor dependence of heat flux per unit area on velocity and turbulence of air flow. Flow velocity and heat flux field of air flow past a heated plate are measured.*

**PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY, HEAT FLUX, NONSTATIONARY AIR FLOW, DIMPLE**