
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.2.08
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-565-570

СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PIV-ТЕХНОЛОГИИ И ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

А. А. ГУСАКОВ

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.gusakov.spb@mail.ru*

Рассматривается методика использования PIV-технологии визуализации течения и градиентной теплотметрии для совместного (в режиме реального времени) исследования течения и теплообмена. Методика реализована на примере обтекания кругового цилиндра потоком воздуха под различными углами атаки.

Ключевые слова: PIV-технология, градиентная теплотметрия, обтекание цилиндра, скорость, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи.

Проблема совместного исследования процессов течения и теплообмена жидкостей и газов хорошо известна, но до последнего времени ее решение сдерживалось отсутствием быстродействующих первичных преобразователей. Ситуация изменилась с появлением градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) [1] с постоянной времени, составляющей $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с.

В настоящей статье рассматривается методика комплексного исследования этих процессов на примере обтекания кругового цилиндра потоком воздуха под различными углами атаки. Градиентная теплотметрия совмещена с PIV-технологией на установке ПОЛИС [2].

Метод PIV (Particle Image Velocimetry) — это измерение скорости потока частиц по их изображению. Основу двумерной реализации метода PIV составляет измерение величины смещения помещенных в поток частиц (трассеров) за известный интервал времени. Результатом является визуализация мгновенных двухкомпонентных полей скорости в измерительной плоскости, формируемой световым ножом. Основное достоинство PIV-технологии — возможность измерения мгновенных полей скорости бесконтактным методом.

При использовании метода стерео-PIV запись изображения производится двумя фотокамерами (1, 2), направленными с разных сторон на трассеры в световом ноже (рис. 1, а). Каждая камера формирует „плоскую картину“ о векторе скорости частицы. Посредством специальной калибровки системы программа Actual Flow, поставляемая с установкой ПОЛИС, определяет третью компоненту вектора скорости. В картине трехмерного поля скорости (рис. 1, б) поперечная компонента выделяется цветом [3]: при одинаковых числах Рейнольдса в следе, наблюдаемом за нагретым цилиндром, поперечная составляющая вектора скорости больше, чем в следе за цилиндром без нагрева. В рассматриваемом случае цилиндр повернут относительно вектора скорости потока на угол $\beta = 60^\circ$.

Модель цилиндра (рис. 2) выполнена из стального листа толщиной 0,1 мм. Цилиндр обогревается насыщенным водяным паром (с температурой, близкой к 100 °С). ГДТП, изготовленный из монокристаллического висмута, смонтирован на поверхности цилиндра (его

размеры и чувствительность указаны на рисунке). Электромеханический привод позволяет проворачивать цилиндр вокруг оси на угол φ от 0 до 180°. Модель установлена на поворотном столе, что обеспечивает возможность изменения угла атаки β между осью цилиндра и направлением потока.

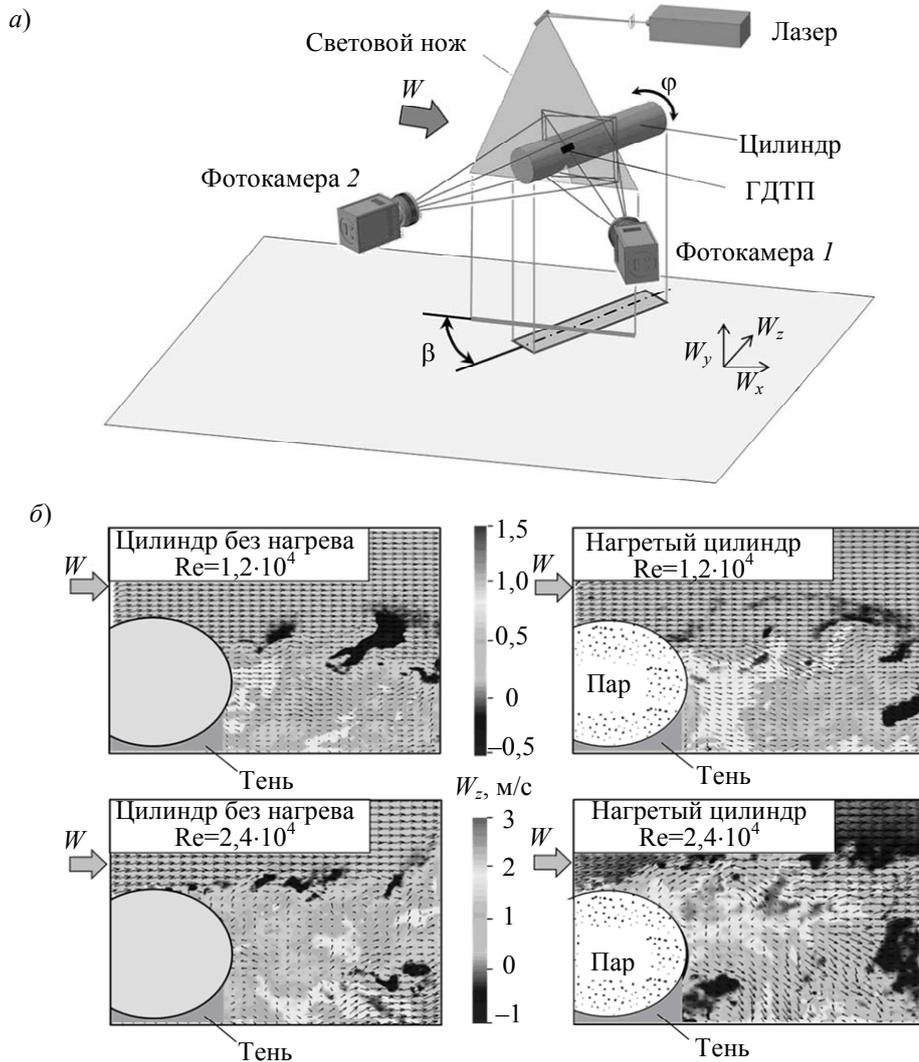


Рис. 1

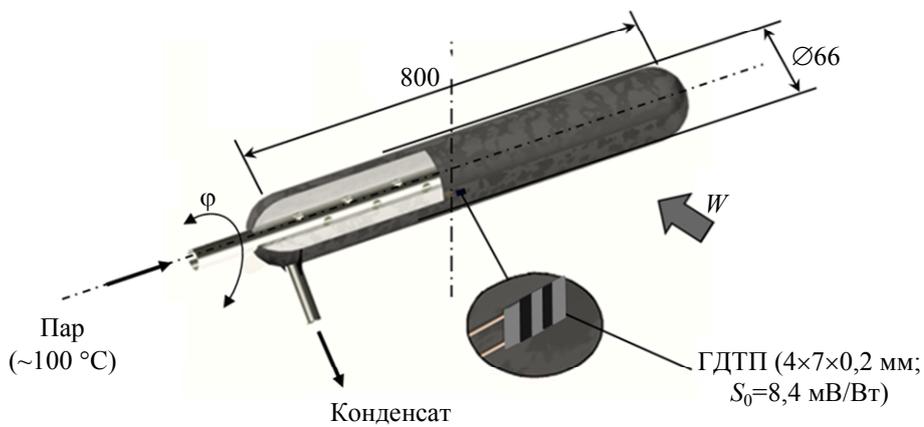


Рис. 2

Эксперимент по реализации предлагаемой методики производился в аэродинамической трубе при поперечном обтекании нагретого цилиндра потоком воздуха со скоростью от 1 до 20 м/с. Степень турбулентности воздушного потока не превышала 0,5 %. Модель была

помещена в камеру Эйфеля из прозрачного материала, что позволяет использовать оптические методы исследования потоков, в том числе и PIV-технологию, без заметного рассеяния дыма. Визуализация и теплотметрия проводились одновременно и непрерывно. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3. Для измерения сигнала ГДТП использовался светолучевой осциллограф Н-145, в котором ртутная лампа заменена на лазер. Луч лазера после отражения от зеркала гальванометра фиксировался цифровой фотокамерой (3), далее сигнал поступал для обработки в компьютер.

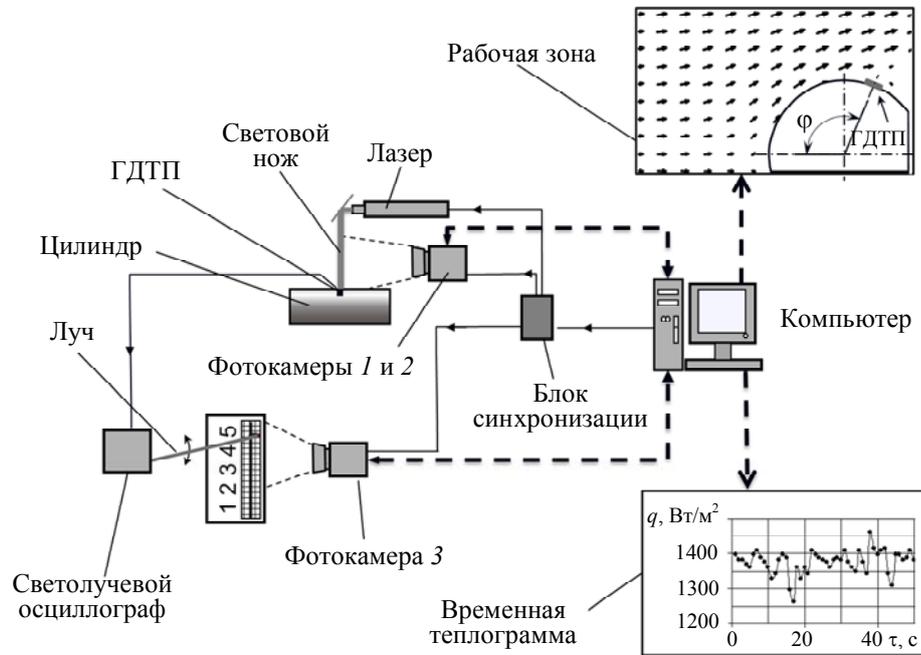


Рис. 3

На рис. 3 также показана зависимость плотности теплового потока от времени ($q(\tau)$) — „временная теплограмма“, названная так в работе [4] по аналогии с общепринятым термином „временная термограмма“. Таким образом, каждой картине мгновенного поля скорости соответствует показание ГДТП при известном его положении.

Исследования проводились для области чисел Рейнольдса от 10^4 до $8 \cdot 10^5$. За время поворота цилиндра синхронно получено 485 пар фотографий и зафиксированы значения сигналов ГДТП. На основании этих данных сформированы поля скорости и соответствующие им значения плотности локальных (в месте расположения ГДТП) тепловых потоков. На рис. 4 приведены временная теплограмма и соответствующая ей картина поля скорости (при $\beta = 90^\circ$, $Re = 2,4 \cdot 10^4$). Разброс значений q_ϕ на теплограмме не связан с неопределенностью градиентной теплотметрии, а показывает значение плотности локального теплового потока в момент измерения поля скорости. Как показала практика, градуировка ГДТП на стенде, описанном в работе [4], обеспечивает суммарную стандартную неопределенность, не превышающую 1 %.

Наибольший интерес представляют эксперименты, когда цилиндр находится под различными углами атаки β к потоку W ($\beta = 45 \dots 90^\circ$) [3], что вызывает трехмерность следа. Среди работ по исследованию влияния угла атаки на интенсивность теплообмена особого внимания заслуживает работа [5], в которой показано, что усредненный тепловой поток плавно убывает до достижения угла $\beta = 15^\circ$ (здесь начало отсчета — от нормали к вектору потока), а затем начинает расти. Таким образом, изменяя угол атаки, можно как уменьшать, так и увеличивать усредненный тепловой поток.

При усреднении мгновенных полей скорости и изменении угла атаки β от 45° до 90° поперечная составляющая вектора скорости потока (при неизменном числе Рейнольдса, равном $1,2 \cdot 10^4$) уменьшается до нуля. Это соответствует классическому представлению о поперечной составляющей.

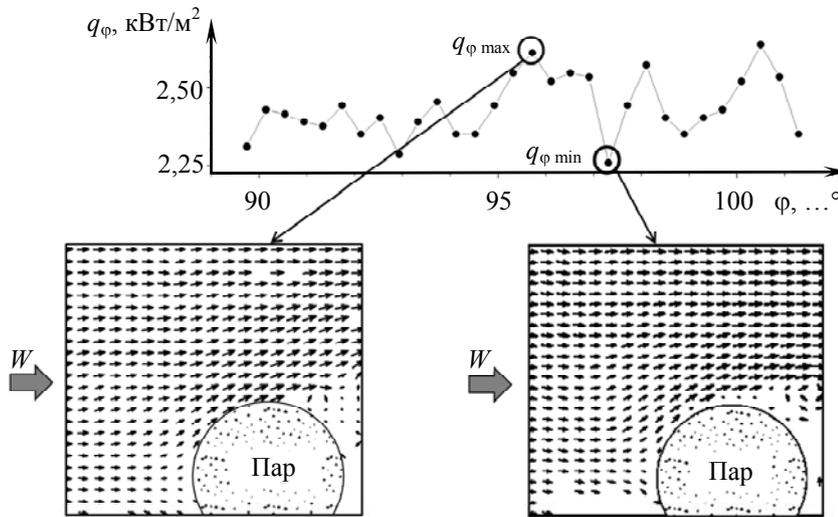


Рис. 4

Результаты градиентной теплотометрии показывают, что плотность локального теплового потока изменяется согласно традиционным представлениям, а средняя плотность теплового потока достигает минимального значения при $\beta = 60^\circ$.

По результатам экспериментов плотность локального теплового потока в точке с угловой координатой φ определялась как

$$q_\varphi = \frac{E}{S_0 F},$$

где E — напряжение ГДТП, F — площадь датчика.

Локальный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_\varphi = \frac{q_\varphi}{T_c - T_w},$$

где T_c — температура поверхности цилиндра, T_w — температура потока воздуха.

Безразмерное локальное число Нуссельта определяется выражением

$$Nu_\varphi = \frac{\alpha_\varphi d}{\lambda_f},$$

где d — диаметр цилиндра, λ_f — теплопроводность воздуха, а среднее число Нуссельта — выражением

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda_f},$$

где α — значение коэффициента α_φ , усредненное по φ в пределах от 0 до 180° .

Зависимость $Nu(Re)$ при различных значениях β представлена на рис. 5.

Для уравнения подобия $Nu = CRe^n$ коэффициенты C и n определены экспериментально и сопоставлены с их значениями, полученными в работе [6] (см. таблицу).

Полученные зависимости среднего числа Нуссельта от угла атаки β и числа Рейнольдса близки к результатам экспериментов, приведенным в работе [6]. Для всех исследованных значений угла β (45...90°) среднее число Нуссельта предсказуемо растет с увеличением числа Рейнольдса.

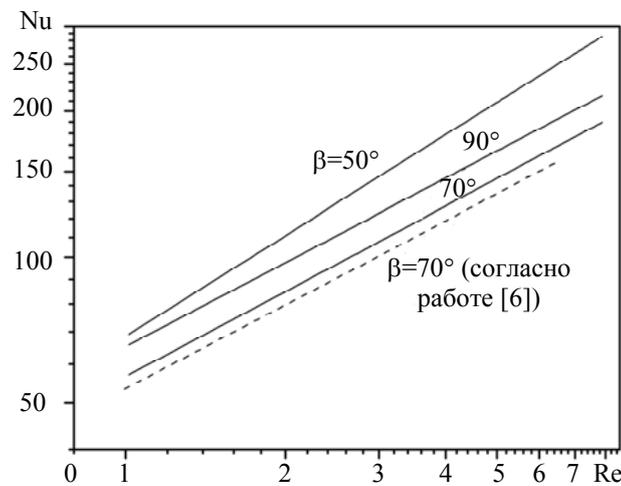


Рис. 5

β, \dots°	Работа [6]		Эксперимент		β, \dots°	Работа [6]		Эксперимент	
	C	n	C	n		C	n	C	n
45	0,161	0,636	0,279	0,609	70	0,270	0,574	0,256	0,586
50	—	—	0,117	0,692	75	0,302	0,561	0,347	0,563
55	—	—	—	—	80	0,200	0,614	—	—
60	0,172	0,634	—	—	85	0,217	0,614	0,214	0,618
65	0,187	0,620	0,239	0,593	90	0,207	0,618	0,317	0,578

Для того чтобы проследить связь между средним числом Нуссельта и структурой потока, необходимо рассмотреть средние поля скорости. В ходе эксперимента установлено, что именно изменение поперечной компоненты W_z вектора скорости в следе за цилиндром определяет изменение средней плотности теплового потока.

Представленные в настоящей статье результаты являются новыми и практически значимыми. Основным выводом можно считать работоспособность предложенной методики, что обеспечивает новые возможности для исследования влияния характера течения на теплообмен в режиме реального времени. Данная методика позволяет получить новые научные результаты при исследовании интенсификации теплообмена с помощью различных турбулизаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Основы градиентной теплометрии. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 203 с.
- „ПОЛИС“ — измеритель полей скорости / Ин-т теплофизики СО РАН, Новосибирск [Электронный ресурс]: <<http://www/itp.nsc.ru/piv/piv.htm>>.
- Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В., Можайский С. А., Гусаков А. А. Градиентная теплометрия: идеи, реализация, результаты // Тр. Академэнерго. 2014. № 3. С. 16—35.
- Сапожников С. З., Митяков В. Ю., Митяков А. В. Градиентные датчики теплового потока. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2003. 168 с.
- Alam Mahabub, Zhou Y. Turbulent wake of an inclined cylinder with water running // J. of Fluid Mechanics. 2007. Vol. 589. P. 261—301.

6. Sparrow E. M., Yanez Moreno A. A. Effect of yaw on forced convection heat transfer from a circular cylinder // Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. 1987. Vol. 30, N 3. P. 427—435.

Сведения об авторе

Андрей Александрович Гусаков — СПбПУ, кафедра теоретических основ теплотехники; заведующий лабораторией; E-mail: a.gusakov.spb@mail.ru

Рекомендована кафедрой
теоретических основ теплотехники

Поступила в редакцию
17.03.15 г.

Ссылка для цитирования: Гусаков А. А. Совместное использование PIV-технологии и градиентной теплотемпературы // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 7. С. 565—570.

COMBINED APPLICATION OF PIV-TECHNOLOGY AND GRADIENT HEAT FLUX MEASUREMENT

A. A. Gusakov

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University,
195251, Saint Petersburg, Russia
E-mail: a.gusakov.spb@mail.ru*

A new method for investigation of flow and heat transfer is proposed. The method combines PIV-technology with gradient heat flux measurement. The method implementation is demonstrated by the example of study of heat transfer and air flow around a cylinder for various values of angle of attack.

Keywords: PIV-technology, gradient heat flux measurement, transverse flow around a cylinder, heat flux, heat-transfer coefficient.

Data on author

Andrey A. Gusakov — SPbPU, Department of Thermodynamics and Heat Transfer; Head of Laboratory; E-mail: a.gusakov.spb@mail.ru

Reference for citation: Gusakov A. A. Combined application of PIV-technology and gradient heat flux measurement // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 7. P. 565—570 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-565-570