

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ

Б. В. Перепелица, Ю. М. Пшеничников
(Новосибирск)

Процессы теплообмена, протекающие в нестационарных условиях, достаточно широко встречаются в различных областях современной техники. Теория нестационарного теплообмена в турбулентных потоках еще далека от своего окончательного завершения, что связано с большими трудностями при математическом описании рассматриваемых процессов. Расчет таких процессов также существенно усложняется ввиду необходимости решения сопряженной задачи, поскольку процессы передачи тепла в теплоносителе неразрывно связаны с развитием температурного поля в стенках канала [1, 2].

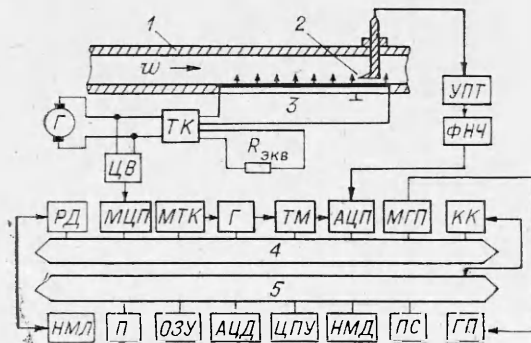
Экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в турбулентных потоках представляет собой довольно сложную техническую задачу, что обусловлено как влиянием большого числа параметров на характер процесса, так и необходимостью быстрого сбора и обработки значительного объема информации. Результаты измерений показали, что влияние нестационарности на процесс теплообмена может быть весьма существенным [2—4]. В то же время расчеты по моделям, в которых заключена гипотеза о квазистационарной структуре турбулентного потока, не всегда дают удовлетворительные результаты [5]. В связи с этим для более глубокого понимания процессов, происходящих при нестационарном теплообмене, требуется достаточно полная и надежная информация о полях скорости и температуры в непосредственной окрестности стенки, включая область вязкого и теплового подслоя.

В настоящей работе представлены результаты измерений развития температурного поля в турбулентном потоке воды при скачкообразном изменении тепловыделения в стенке канала. Измерения проведены в диапазоне чисел Рейнольдса от 11 200 до 112 000 и охватывают близкую пристенную область, включая вязкий подслой. Опыты проводились на замкнутом гидродинамическом контуре, в состав которого входили бак постоянного уровня, рабочий участок, приемный бак, холодильник и насос. В качестве рабочего участка (рис. 1) использовался канал 1 прямоугольного сечения размером 20×40 мм, состоящий из секции гидродинамической стабилизации длиной 96 калибров и участка нагрева 3 длиной 36 калибров. Три стенки обогреваемой секции изготовлены из оргстекла, а одна (шириной 40 мм) — из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм, наклеенной на стеклотекстолитовое основание. Лента омывалась потоком рабочей жидкости и нагревалась путем пропускания через нее электрического тока.

Регистрация температуры в потоке осуществлялась специально изготовленным термопарным зондом 2 игольчатого типа с поперечным размером горячего спая около 5 мкм. Термопарный зонд вводился в поток через верхнюю необогреваемую стенку канала на расстоянии 78 см от начала участка нагрева. Температура в потоке измерялась относительно температуры холодной стенки в исследуемом сечении. Это позволяло исключить влияние на результаты

опытов небольших колебаний температуры рабочей жидкости во время опытов. Перепад температуры между холодной и горячей стенками канала не превышал 10 К. Абсолютная погрешность измерения мгновенной температуры $\pm 0,07$ К. Более детально конструкция зонда и устройство экспериментальной установки представлены в [6].

Питание нагревателя происходило от генератора пос-



Р и с. 1

тоянного тока. Процесс нестационарного теплообмена вызывался скачкообразным изменением подводимой электрической мощности к ленточному нагревателю, что приводило к резкому изменению тепловыделения. Результаты измерений статистических характеристик пульсаций температуры в турбулентном потоке при стационарном теплообмене опубликованы в [7].

Управление экспериментом, сбор и обработка экспериментальной информации производились с помощью микрокомпьютерной системы «МЕРА-60», построенной на базе микроЭВМ «Электроника-60». Система (см. рис. 1) содержит процессор (П), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), алфавитно-цифровой дисплей (АЦД), цифропечатающее устройство (ЦПУ), накопитель на гибких магнитных дисках (НМД), перфоленточную станцию (ПС), крейт КАМАК 4, соединенный с каналом микроЭВМ 5 через крейт-контроллер (КК). Наличие в составе системы крейта КАМАК дает возможность использовать стандартные программно-управляемые модули для связи первичных преобразователей с микроЭВМ.

Программное управление нагревателем канала проводилось через модуль тиристорного ключа (МТК). Тиристорный ключ (ТК) переключает ток генератора с нагревателя на дополнительное эквивалентное сопротивление $R_{ЭКВ}$ и наоборот. Допустимое коммутируемое напряжение генератора 5—100 В, ток 1—150 А. Длительность переходных процессов при переключении мощности не превышала 0,5 мс. Напряжение, подводимое к нагревателю, контролировалось цифровым вольтметром (ЦВ), соединенным с магистралью КАМАК через модуль цифрового прибора (МЦП).

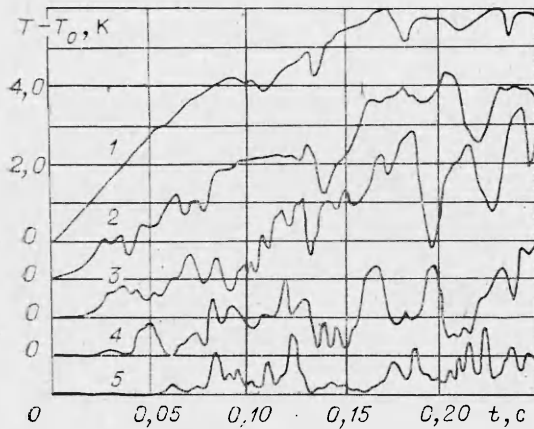
Сигнал с термодатчика подавался на усилитель постоянного тока (УПТ) с гальваническим разделением входа и выхода и уровнем собственных шумов, приведенным ко входу, не более 1,5 мкВ. Рабочая полоса частот ограничена сверху параметрами УПТ (400 Гц) и перестраиваемым фильтром низких частот (ФНЧ). С выхода ФНЧ напряжение, пропорциональное локальному перегреву рабочей жидкости, поступало на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Запуск АЦП осуществлялся импульсами таймера (ТМ), работавшего в режиме деления частоты стабильного генератора (Г) и формировавшего нужные периоды запуска АЦП по командам ЭВМ. Для более точной привязки выборки АЦП к фазам исследуемых сигналов генератор частоты синхронизировался импульсами переключения нагревателя.

Для хранения экспериментальной информации использовался накопитель на магнитной ленте ЕС 9002 (НМЛ), который подключался к магистральной КАМАК через модуль регистра данных (РД). Для вывода результатов расчета в виде графиков с помощью модуля графопостроителя (МГП) подготавливался графопостроитель Н-306 (ГП).

Время разогрева и охлаждения подбиралось для каждого режима течения из условия выхода температуры на стационарное значение. Период запуска АЦП изменялся программно в течение фазы нагрева (охлаждения) для того, чтобы при минимуме отсчетов выявить наиболее характерные участки переходных процессов. На начальной стадии разогрева период запуска АЦП на порядок меньше, чем на заключительном этапе. Аппаратура позволяла производить запуск АЦП с минимальным периодом 2 мс. Отсчет времени производился с момента включения и выключения тепловой нагрузки.

В ходе эксперимента периодически включался и выключался нагреватель, и в заданные моменты времени (по 40 значений на фазу нагрева и охлаждения) проводилось измерение мгновенных значений температуры в потоке, которые записывались в память ЭВМ. По истечении 100 периодов разогрева исходный массив мгновенных значений температуры переписывался из оперативной памяти на магнитную ленту и цикл накопления данных повторялся.

По исходным массивам мгновенных значений температуры ($N = 16\ 000$) проводился расчет средних значений интенсивностей пульса-



Р и с. 2

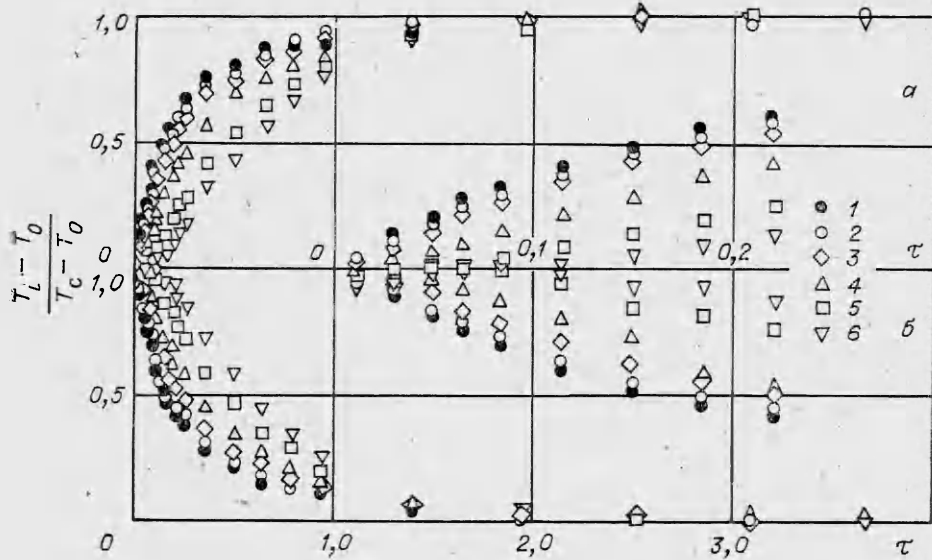
мой точке, T_0 — температура набегающего потока, кривые 1—5 соответствуют координатам $y = 20; 45; 80; 130; 300$ мкм. Число Рейнольдса определялось как $Re = wD_r/\nu$ (w — средняя расходная скорость, D_r — гидравлический диаметр канала, ν — кинематическая вязкость жидкости). Начальная температура воды ($T_0 = 291-297$ К) принята в качестве определяющей при расчете физических свойств жидкости. Как видно из графика, близко от стенки в начальный момент времени происходит резкий практически линейный рост температуры. Процесс переноса тепла на этой стадии в основном определяется чистой теплопроводностью. Однако уже на ранней стадии развития температурного поля в близкой пристенной зоне наблюдаются отклонения температуры в сторону ее уменьшения. Такие колебания температуры вызваны проникновением к стенке холодных молекул жидкости из внешней области потока. С удалением от стенки имеет место обратная картина: резкие отклонения температуры происходят в сторону ее увеличения, что можно рассматривать как выбросы нагретой жидкости из пристенной зоны.

На рис. 3 в безразмерных координатах приведен график изменения во времени осредненной температуры по сечению канала для $Re = 61\ 000$ при включении (а) и выключении (б) тепловой нагрузки. В качестве безразмерной температуры взято отношение текущего перегрева набегающей жидкости $T_i - T_0$ в данной точке к его значению в стационарных условиях $T_c - T_0$, где T_i — осредненное значение температуры в потоке в момент t , T_c — стационарное локальное значение температуры в потоке при включенном нагревателе. В качестве безразмерного времени взято $\tau = tw/L$ (L — расстояние от начала нагрева до измеряемого сечения, t — текущее время). Точки 1—6 соответствуют безразмерным координатам $Y^+ = yv_*^*/\nu = 1,1; 1,9; 2,8; 6,8; 20,5; 71,2$ (v_*^* — динамическая скорость). Полученные опытные данные показывают, что изменение температуры происходит с убывающим темпом, асимптотически приближаясь к стационарному значению. С удалением от стенки в начальный момент времени наблюдается более медленный темп роста температуры. В дальнейшем он увеличивается, так что в результате время выхода температуры на стационарное значение практически постоянно по всему сечению канала. Кривые развития относительной температуры в потоке на стадиях разогрева и охлаждения жидкости имеют симметричную форму. В области вязкого подслоя ход температурных кривых слабо изменяется с увеличением расстояния от стенки. Результаты измерений для области вязкого подслоя при различных Re (рис. 4) показывают, что кривые относительной средней температуры в развитом турбулентном потоке хорошо группируются около одной линии; точки 1—4 отвечают $Re = 11\ 200; 29\ 100; 61\ 000; 112\ 000$. Для фазы разогрева полученные данные в области $\tau = 0-2$ можно аппроксимировать зависимостью

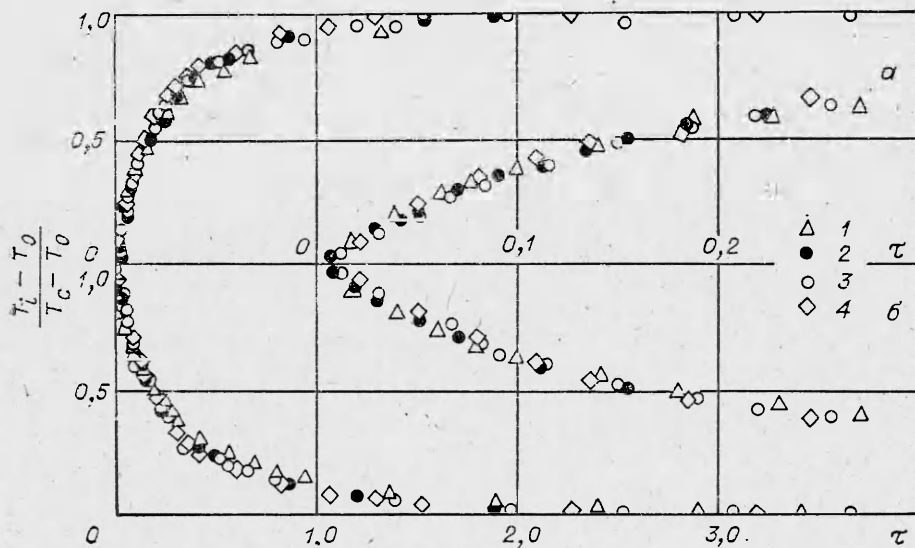
$$T_i - T_0 / T_c - T_0 = \Theta_p = 0,94\tau^{(0,129 - 0,117\ln\tau)}.$$

ций температуры в различные моменты времени разогрева и охлаждения рабочей жидкости. Доверительные границы погрешности оценки среднего значения температуры при данной статистике с доверительной вероятностью 95% не превышают $\pm 0,05$ К.

Характерные осциллограммы развития мгновенной температуры в начальной стадии разогрева жидкости на различных расстояниях от стенки при $Re = 29\ 100$ представлены на рис. 2, где T — мгновенное значение температуры в исследуе-



Р и с. 3



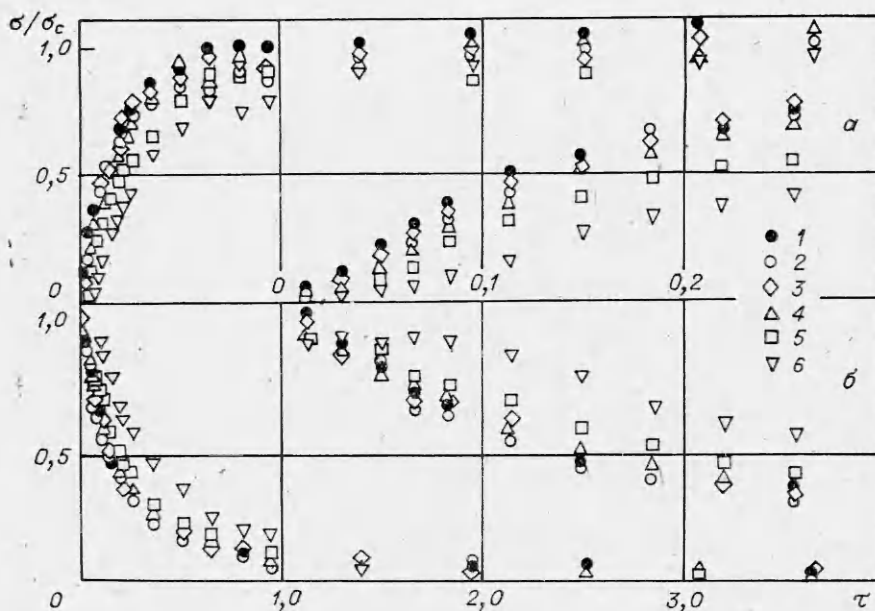
Р и с. 4

Формула получена обработкой 52 экспериментальных значений для $Re = 29\ 100; 61\ 000; 112\ 000$ по методу наименьших квадратов. Среднеквадратичная ошибка аппроксимации 3%. Кривые для фазы охлаждения можно описать эмпирической зависимостью

$$T_i - T_0 / T_c - T_0 = \Theta_n = 1 - \Theta_p = 1 - 0,94\tau^{(0,129 - 0,117 \ln \tau)}.$$

При $Re = 11\ 200$ наблюдается несколько более медленный темп роста температуры. Для $\tau \lesssim 0,1$ рост температуры описывается линейной зависимостью $\Theta_p = 4\tau$.

Данные по развитию интенсивности температурных пульсаций на различных расстояниях от стенки при $Re = 61\ 000$ представлены на рис. 5 (при тех же параметрах, что и на рис. 3). На графиках величина среднеквадратичного значения пульсаций температуры $\sigma = \sqrt{\langle T'^2 \rangle}$ в различные фазы разогрева и охлаждения рабочей жидкости отнесена к



Р и с. 5

значению данной величины в условиях стационарного теплообмена. Приведенные зависимости по характеру развития аналогичны полученным данным для осредненной температуры. В начальный момент времени наблюдается линейный рост величины $\sigma/\sigma_c \approx 4\tau$, в дальнейшем темп роста убывает более медленно, чем у осредненной температуры, так что выход на стационарное значение происходит практически при $\tau \approx 1$. Результаты измерений σ/σ_c при различных Re в области вязкого подслоя группируются около одной линии (подобно данным рис. 4).

Проведенный анализ показывает, что полученные экспериментальные результаты по развитию относительной температуры и интенсивности температурных пульсаций для области вязкого подслоя в турбулентном потоке жидкости могут быть обобщены с помощью безразмерного масштаба времени $\tau = tw/L$. Время $t = L/w$ характеризует продолжительность пребывания жидкости на участке от начала нагрева до измеряемого сечения. В начальный момент времени рост температуры определяется главным образом механизмом теплопроводности и незначительным воздействием на него процессов турбулентного переноса.

Авторы выражают благодарность Е. М. Хабахпашевой за обсуждение и полученные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теплообмен. Справочник.— М.: Энергия, 1978.
2. Калинин Э. К., Дрейцер Г. А., Костюк В. В., Берлин И. И. Методы расчета сопряженных задач теплообмена.— М.: Машиностроение, 1983.
3. Галицкий Б. М., Рыжов Ю. А., Якуш Е. В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках.— М.: Машиностроение, 1977.
4. Беляев Н. М., Кочубей А. А., Рядно А. А., Фалий В. Ф. Нестационарный теплообмен в трубах.— Киев — Донецк: Вища школа, 1980.
5. Дрейцер Г. А. Влияние изменения турбулентной структуры потока на нестационарный теплообмен при нагревании газов и жидкостей в трубах.— ИФЖ, 1982, т. 43, № 6.
6. Перепелица Б. В. Статистические характеристики пульсаций температуры в турбулентном потоке воды.— В кн.: Теплообмен-V. Минск, 1976, т. 1, ч. 1.
7. Кугателадзе С. С., Хабахпашева Е. М., Перепелица Б. В. Пульсации температур в вязком подслое.— В кн.: Теплообмен, 1978. Сов. исследования. М.: Наука, 1980.

Поступила 23/V 1985 г.