

Пространственно-временные характеристики температурных пульсаций турбулентного потока и измерения скорости на их основе

П. А. Сардов^{1,2}, А. Н. Сорокин¹ и И. А. Беляев¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский энергетический институт (технический университет), Красноказарменная ул., 14, Москва 111250, Россия

E-mail: sardovpa@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2020 г.

Аннотация. В работе описана методика температурно-корреляционных измерений скорости, применяемая к течению воды или жидкого металла. Метод позволяет одновременно измерять температурные сигналы и локальные значения продольной компоненты скорости в потоке. Такой подход является простым и надежным методом измерения скорости в потоках оптически непрозрачных сред. В одних и тех же условиях течения различные теплоносители имеют разные пространственно-временные характеристики, которые обрабатываются, используя температурно-корреляционную методику. Данная работа посвящена разработке алгоритма, позволяющего сформулировать комплекс практических рекомендаций по применению данной техники для измерения скорости и определить метрологические характеристики в различных условиях. Для калибровки в качестве модельной жидкости использовались вода и ртуть. Описана экспериментальная установка и разработанный температурно-корреляционный датчик, входящий в измерительный комплекс. Проведение измерений непосредственно внутри потока стало возможным благодаря уникальной технологии микротермопарных погружных зондов. Полученные данные представлены в виде полей температуры и интенсивности температурных пульсаций. Были сопоставлены автокорреляционные и взаимно-корреляционные функции для двух исследуемых жидкостей в одинаковых условиях. <https://doi.org/10.33849/2020204>

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования гидродинамики и теплообмена в условиях, близких к режимным параметрам современных энергетических установок, являются неотъемлемой частью обоснования эффективности и безопасности таких установок. Жидкие металлы и другие перспективные теплоносители (например, расплавленные соли) используются или рассматриваются для применения в ряде экспериментальных и уже введенных в эксплуатацию реакторов, таких как БН (быстрый реактор, охлаждаемый натрием), БРЕСТ (быстрый реактор, охлаждаемый свинцом) и тестовых модулей blankets термоядерных реакторов типа ТОКАМАК.

Измерение скорости в потоке жидкого металла осложняется рядом факторов: высокой температурой, высокой электропроводностью, химической активностью, высокой плотностью и оптической непрозрачностью теплоносителя. Информации об осреднённых характеристиках потока вполне достаточно для расчета эффективности систем с меньшим количеством осложняющих факторов. Однако, для расчета коэффициентов теплоотдачи при значительном влиянии термогравитационной конвекции (ТГК) на турбулентный поток жидкого металла [1, 2], классические методы неприменимы. В этом случае необходимо, с высокой точностью, знать локальные значения скорости и температуры. Неоднородность и асимметрия профилей скорости, а соответственно и температуры, представляет наибольший интерес в вопросе обоснования устойчивости при длительной стационарной эксплуатации энергетических установок.

Большинство разработанных и хорошо изученных методов неприменимы из-за этих факторов. Выходом из данной ситуации является перспективный температурно-корреляционный метод [3], использующий температурные сигналы для дальнейшей оценки

продольной скорости с помощью статистического подхода. Корреляционные методы широко применяются с различными базовыми сигналами, в том числе, для оптического детектирования воздушно-водной фазы [4], анализа скалярных изображений [5] и сигналов электромагнитных расходомеров [6] и т.д.

Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена в условиях высоких тепловых нагрузок в конфигурациях, аналогичных современным энергетическим установкам, требуют специальной диагностики. Особый интерес представляет получение детальных профилей локальных скоростей и температур на стенке и статистических характеристик пульсаций потока. Получение данных с высокой точностью стало возможным благодаря уникальной методике погружных зондов. Зонд оснащен специальным микротермопарным корреляционным датчиком, разработанным и изготовленным нашей командой.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Температурно-корреляционный метод (ТКМ) является одним из самых простых и надежных, используемых [7–9] для измерения скорости в таких условиях. Единственным требованием к использованию погружных зондов является высокая герметичность и долговечность термопарных датчиков. ТКМ основан на измерениях температуры в нескольких точках потока [10, 11] с последующей обработкой сигнала с использованием корреляционного анализа.

Автокорреляционная функция (АКФ) (1) характеризует степень корреляции между отдельными значениями измеряемых параметров единственного централизованного сигнала и несет такую же информацию, как и спектральная плотность энергии.



Рисунок 1. Схема ТКМ.

Для дискретного сигнала, характерного для измерений, АКФ может быть определена по формуле:

$$R_{11}(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_1(i \cdot \Delta\tau) T_1(i \cdot \Delta\tau + s). \quad (1)$$

где s — временной сдвиг, $s = j \cdot \Delta\tau$, $j = 0, 1, \dots$, сек; $\Delta\tau$ — шаг по времени, сек; n — размер выборки.

Анализ формы АКФ позволяет сделать вывод о структуре сигнала в точке и дать рекомендации о длине выборки и необходимом зазоре между точками измерения взаимно-корреляционной функции (ВКФ).

Взаимно-корреляционная функция (2) сигналов термопар корреляционного датчика скорости может быть определена по формуле:

$$R_{12}(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_1(i \cdot \Delta\tau) T_2(i \cdot \Delta\tau + s). \quad (2)$$

где s — временной сдвиг, $s = j \cdot \Delta\tau$, $j = 0, 1, \dots$, сек; $\Delta\tau$ — шаг по времени, сек; n — размер выборки.

Поскольку метод ТКМ основан на использовании естественного фона турбулентных пульсаций, зная время задержки второго сигнала, можно определить осредненное по времени значение локальной скорости потока.

Для повышения точности измерений необходимо добиться полной гидродинамической стабилизации потока в измеряемой точке, а также, по возможности, минимизировать расстояние между термопарами (рисунок 1) с целью локализации измерений ($l = 5$ мм). Такой подход применен в работах [12–14]. Если же точки измерения расположены на значительном расстоянии [10, 11, 15], то необходимо учитывать изменения самого потока (эффект пространственного осреднения), что вызывает дополнительные трудности.

Далее под ТКМ понимается метод локального измерения значений продольной составляющей скорости в поперечном сечении канала без создания существенных возмущений в потоке и без необходимости учитывать изменение потока между точками измерений.

3. УСЛОВИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Наладочные эксперименты с использованием датчика ТКМ проводились на стенде РК-3 (рисунок 2); для калибровки в качестве модельной жидкости использовалась вода (РК-3 — установка, включающая разделённые водный и ртутный контуры [15], первоначально созданная для исследования жидкометаллических теплоносителей).

Циркуляция в контуре обеспечивается химическим центробежным насосом, пульсации давления после насоса эффективно снижаются за счет совместной работы редуктора и системы мембранного и воздушного гаси-

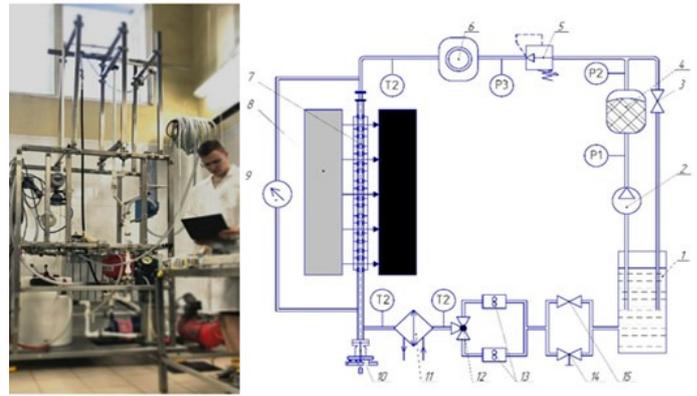


Рисунок 2. Принципиальная схема водного контура РК-3: 1 — накопительный резервуар, 2 — центробежный насос, 3 — клапан, 4 — гаситель пульсаций мембранного типа, 5 — редуктор давления, 6 — гаситель пульсаций воздушного типа, 7 — рабочий участок, 8 — электромагнит, 9 — датчик давления, 10 — измерительный зонд, 11 — теплообменник, 12 — трехходовой шаровый кран, 13 — турбинные расходомеры ТПР-4 и ТПР-8, 14 — клапан, предназначенный для «грубой» регулировки, 15 — клапаны, предназначенные для «плавной» регулировки.

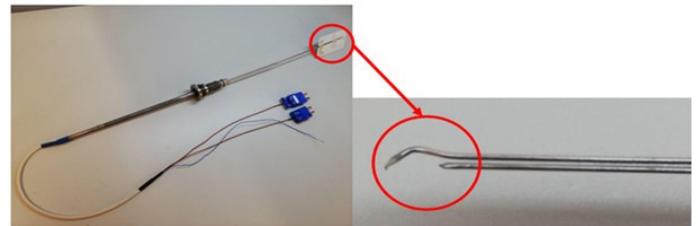


Рисунок 3. Поворотный зонд и датчик ТКМ.

теля. В результате, на вход в рабочий участок (тонкостенная труба с внутренним диаметром 19 мм и толщиной стенки 0.5 мм) поступает поток, гидродинамическая стабилизация которого происходит на первых 60 калибрах экспериментальной секции, а на следующих 40 калибрах производятся измерения. На выходе из рабочего участка, в зоне нагрева, установлен поворотный сканирующий зонд (рисунок 3), на конце которого установлен датчик ТКМ.

Градуировка датчиков [16] проходила следующим образом: устанавливался и фиксировался расход. Далее по формуле Рейхардта [17] рассчитывался профиль скорости и сопоставлялся с данными измерений. Задавался минимальный тепловой поток, при котором регистрировались турбулентные пульсации, и который не приводил к появлению вторичных течений, искажающих значение поля скорости. При установленных параметрах снималось значение скорости на оси трубы. Это значение скорости ставилось в соответствие с теоретически рассчитанным по формуле Рейхардта. Из графика (рисунок 4) видно, что измеренные значения скорости оказываются ниже истинных (расчетных) значений.

Данный результат объясняется тем, что за первой микротермопарой в потоке возникает слой заторможенной жидкости, который попадает на вторую микротермопару. Соответственно, измеренная скорость оказыва-

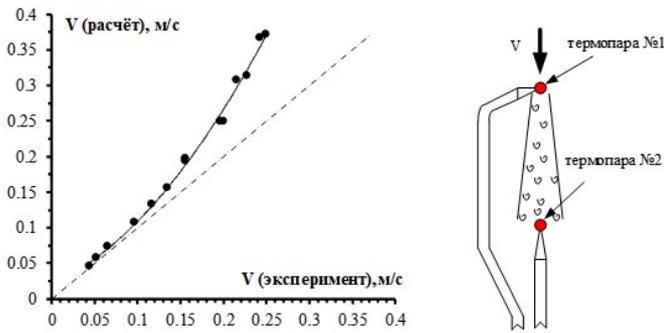


Рисунок 4. Результаты градуировки датчика и схема течения потока передней термопарой.

ется ниже, чем в невозмущенном датчиком потоке. И это возмущение тем больше, чем больше скорость потока. Вводя поправку, можно компенсировать эту методическую погрешность.

Разработанная методика успешно применяется на ртутных стендах комплекса МЭИ-ОИВТ РАН в условиях сильных магнитных полей. Успешная апробация методики проведена на крупномасштабном водном стенде [18].

Была изучена базовая конфигурация — вертикальная однородно обогреваемая труба внутреннего диаметра 19 мм. В таких условиях режимом течения управляют два параметра: число Рейнольдса $Re = ud/\nu$ (где u — средняя скорость, d — диаметр трубы, ν — кинематическая вязкость) и число Грасгофа $Gr = g\beta q_c d^4/\lambda\nu^2$ (где g — ускорение свободного падения, m/c^2 ; β — коэффициент теплового расширения, $1/K$; q — плотность теплового потока, $Вт/м^2$; λ — теплопроводность, $Вт/(м\cdot K)$). Описанная выше методика позволяет получить детальную картину состояния потока в заданном поперечном сечении. Пример приведен на рисунке 5 для воды и ртути в идентичных условиях и параметрах потока. Поля безразмерной интенсивности пульсаций температуры определяются как: $\sigma^* = \sigma\lambda/(qd)$, где σ — интенсивность пульсаций температуры, $^{\circ}C$. Так как молекулярная теплопроводность сред значительно отличается, поля так же существенно различаются.

Жидкий металл обладает высокой молекулярной теплопроводностью, что при прочих равных обеспечивает больший прогрев жидкости в сечении канала. При этом расширяется область существенных температурных пульсаций, что позволяет достичь более высокого отношения сигнал/шум при реализации метода ТКМ и облегчает его применение.

С другой стороны, детальные температурные осциллограммы и их автокорреляционные функции (рисунок 6) показывают, что для воды температурные сигналы имеют большую частоту, что дает больше статистической информации при той же длине измерения. Эти данные соответствуют ранним исследованиям структуры течения жидкого металла и воды [19, 20].

Форма взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сильно связана с автокорреляционной функцией (АКФ) базовых сигналов, так как в большинстве случаев смещение ВКФ производит перевод в АКФ (пример — рисунок 7). Для минимизации неопределенности измерений скорости ТКМ необходимо точно идентифициро-

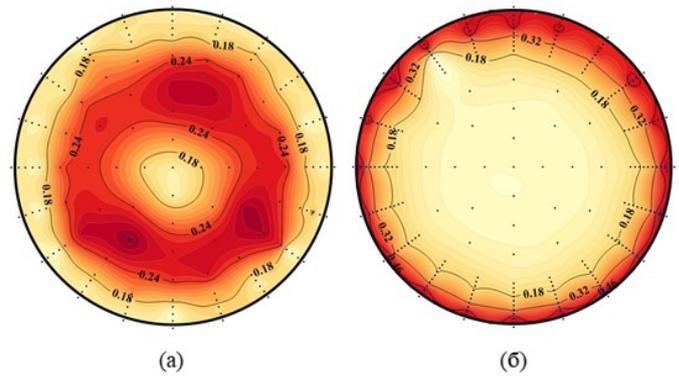


Рисунок 5. Поля безразмерной интенсивности пульсаций температуры: (а) — жидкий металл, (б) — вода. $Gr = 1.1 \cdot 10^7$, $Re = 10000$, полностью развитое течение в трубе. Точки — локальные измерения.

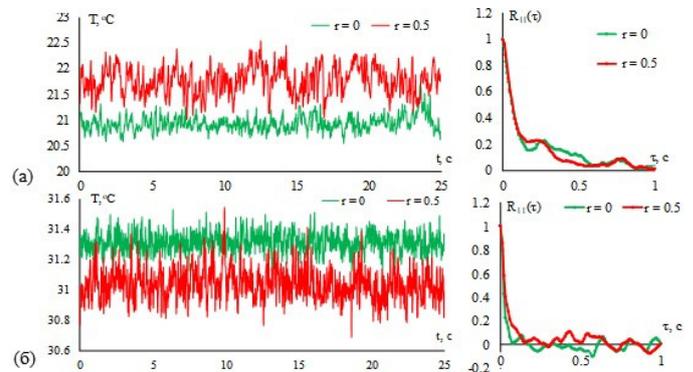


Рисунок 6. Осциллограммы и автокорреляционные функции в центре трубы и при $r = 0.5$ в условиях, соответствующих рисунку 4: (а) — жидкий металл, (б) — вода.

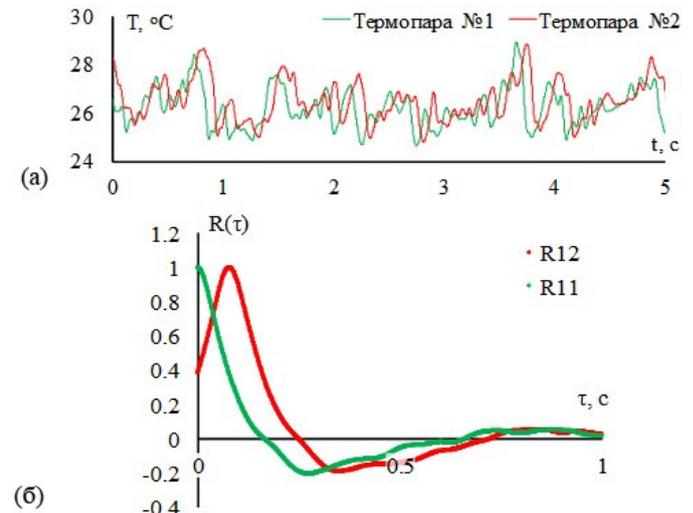


Рисунок 7. Сигналы температурных пульсаций: (а) — из центра трубы в потоке ртути. Условия соответствуют рисунку 4. Измерения проводятся с помощью датчика ТКМ, определяющих размер $l = 5$ мм; (б) — взаимно-корреляционная (R_{12}) и автокорреляционная (R_{11}) функции полученных сигналов.

вать пик ВКФ. Анализ АКФ является первым шагом в оптимизации метода ТКМ. Проведенные эксперименты, расширяют опыт применения корреляционного анали-

за температурных сигналов, что позволяет сформулировать рекомендации для использования метода в жидких металлах и неметаллических жидкостях.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение характеристик автокорреляционной функции температурного сигнала является важным шагом для определения применимости температурно-корреляционного метода. Различные по своей природе жидкости в одинаковых условиях (при одинаковых числах Рейнольдса) разительно отличаются при измерении статистических характеристик их температурных пульсаций, что вызвано как различной динамикой турбулентности в металлах и неметаллах, так и инерционностью датчиков измерителей. Серия измерений на воде и ртути выявила различия в требованиях к параметрам исходной пары температурных сигналов для взаимно-корреляционного измерения скорости в жидких металлах и неметаллических капельных жидкостях. Текущая экспериментальная работа посвящена разработке практических способов, позволяющих сформировать комплекс простых рекомендаций по применению температурно-корреляционного метода измерения скорости и определению метрологических характеристик в различных условиях.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-479.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свиридов В Г 1989 *Исследование гидродинамики и теплообмена в каналах применительно к проблеме создания термоядерного энергетического реактора* (М.: Издательство МЭИ)
2. Ибрагимов М Х, Субботин В И, Бобков В П, Сабелев Г И и Таранов Г С 1978 *Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах* (М.: Атомиздат)
3. Belyaev I A, Razuvanov N G, Sviridov V G and Zagorsky V S 2017 *Flow Measurement and Instrumentation* **55** 37
4. Chanson H *et al* 2007 *Environmental Fluid Mechanics* **6** 495
5. Tokumaru P *et al* 1995 *Experiments in Fluids* **1** 1
6. Dubovikova N *et al* 2016 *Measurement Science and Technology* **5** 055102
7. Zhilin V G *et al* 1988 *Magnetohydrodynamics* **3** 382
8. Ricou R and Vives C 1982 *Int. J. Heat. Mass Transf.* **25** 1579
9. Malcolm D G 1970 *Magnetohydrodynamics* **2** 55
10. Horanyi S *et al* 1999 *Int. J. Heat. Mass Transf.* **21** 3983
11. Frick P *et al* 2015 *EPL* **1** 14002
12. Rockwell S 2012 (United Kingdom: Worcester Polytechnic Institute)
13. Motevalli V *et al* 1992 *J. Heat. Transf.* **2** 331
14. Delarochelambert P 2000 *Proceedings of the 3rd ETS Conference* 675
15. Belyaev I A and *et al* 2017 *Therm. Eng.* **11** 841
16. Беляев И А, Поддубный И И, Разуванов Н Г, Свиридов В Г и Загорский В С 2013 *Сборник докладов научнотехнической конференции "Теплофизика реакторов на быстрых нейтронах" (Теплофизика-2013)* 66-68
17. Генин Л Г и Свиридов В Г 2001 *Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах* (М.: МЭИ)
18. Опанасенко А Н, Сорокин А П, Труфанов А А, Денисова Н А, Свиридов Е В, Разуванов Н Г, Загорский В Г и Беляев И А 2017 *Атомная энергия* **123** 21-27
19. Ibragimov M K and *et al* 1968 *TVT* **6** 1066
20. Eyler L L and Sesonske A 1980 *Int. J. Heat. Mass Transf.* **11** 1561