

УДК 532.5

**ИЗМЕРЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕНОСА  
В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКАХ ЖИДКОГО НАТРИЯ**

© 2011 г.

*П.Г. Фрик, С.А. Денисов, В.Н. Носков*

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь

frick@icmm.ru

*Поступила в редакцию 24.08.2011*

Представлены результаты прямых замеров турбулентной вязкости и эффективной магнитной диффузии в турбулентных потоках электропроводящих жидкостей или со средними значениями чисел Рейнольдса выше единицы. Замеры выполняются в нестационарном турбулентном потоке жидкого натрия, возникающем в замкнутом тороидальном канале. Пик чисел Рейнольдса достигал значений свыше 3000000, что соответствует магнитному числу Рейнольдса порядка 30.

*Ключевые слова:* турбулентность, МГД-турбулентность, турбулентный перенос, турбулентная вязкость, турбулентная магнитная диффузия.

Основой экспериментальной установки является титановый тороидальный канал, установленный на горизонтальный вал и заполненный жидким натрием, с контролируемой температурой 103 °С. Осевой радиус тора  $R = 0.18$  м, радиус сечения  $r = 0.08$  м, объем 22.5 литра. Разгон тора осуществляется двигателем постоянного тока мощностью 14 кВт, торможение – гидравлической тормозной системой, собранной на базе автомобильного дискового тормоза. Время торможения не более 0.3 с (установка имеет также оптоэлектронный тахометр частоты вращения тора). Такая конструкция позволила получить потоки жидкого натрия с числами Рейнольдса, превышающими  $3 \cdot 10^6$  (и соответствующими им магнитными числами Рейнольдса больше 30).

На канал намотана тороидальная катушка возбуждения (58 витков термостойкого провода сечением 1.5 мм<sup>2</sup>), которая создает в нем переменное магнитное поле стабильной (30–1000 Гц, ток 2 А) частоты. Для регистрации магнитного потока в канале на тор компактно намотаны две диаметрально расположенные катушки. Каждая содержит по 20 витков провода, и соединены они последовательно (ЭДС суммируются).

Измерения скорости потока натрия относительно стенок канала производились двухкоординатным кондукционным датчиком с чувствительностью  $(106 \pm 3) \cdot 10^{-6}$  Вс/м. Сигналы датчика формировались слоем потока 1 мм на расстоянии 1.2 мм от стенки и усиливались встроенными в цилиндрическую полость вала прецизионными операционными усилителями AD624 (коэффици-

ент усиления 1000). При выполнении экспериментов производился разгон тора до заданной скорости. Далее отключается электродвигатель и начинается регистрация измеряемых параметров. Спустя примерно 0.6 с включалась система торможения, и через 0.1–0.3 с происходила полная остановка канала. Относительная скорость потока натрия в этот момент времени максимальна, он принят за точку отсчета времени. Спустя 10 с регистрация параметров эксперимента прекращается.

Мерой коэффициента магнитной диффузии является фазовый сдвиг между током возбуждения и магнитным потоком в канале (ЭДС измерительных катушек)  $\Delta\theta \approx C\rho^{-1}\Delta\rho = C\eta^{-1}\Delta\eta$ , где  $C$  – коэффициент, зависящий от геометрии канала, проводимости его стенок и частоты поля. Этот коэффициент определяется путем калибровки системы – измерения при фазовом переходе в натрии (кристаллизация–плавление), который сопровождается изменением удельного сопротивления натрия на 31%.

На рис. 1а представлена эволюция сдвига фаз, полученная при различных скоростях вращения канала для частоты наложенного магнитного поля 97 Гц. На врезке эти же данные показаны в линеаризованных координатах. Измерения проводились при различной частоте наложенного поля (различных глубинах скин-слоя). Пиковые значения коэффициента магнитной диффузии демонстрируют большой разброс. Однако на стадии вырождения потока зависимость полученных значений от числа Рейнольдса (средней скорости потока) имеет

монотонный характер. Отклонения значения магнитной диффузии от базового (ламинарного) значения для момента времени  $t = 0.7$  с приведено на рис. 1б в зависимости от скорости вращения канала. Для больших скоростей зависимость стремится к корневому закону и достигает 20%. При этом отметим, что максимальное отклонение коэффициента диффузии составило порядка 50%.

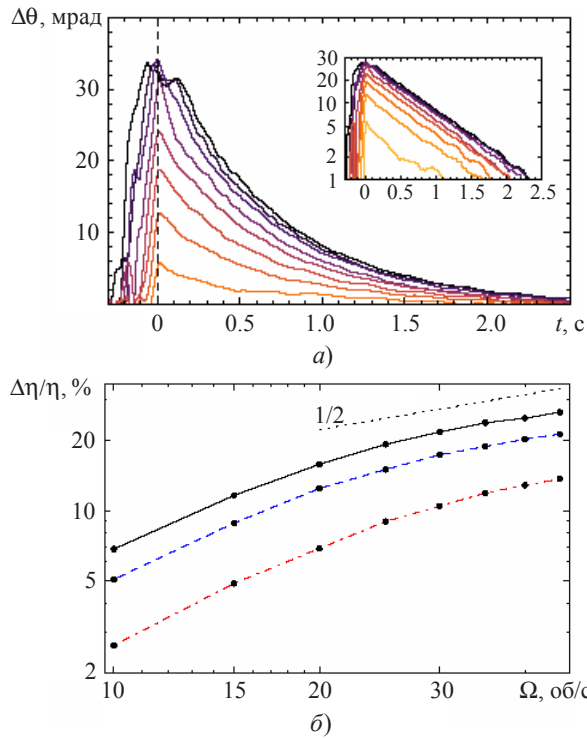


Рис. 1

В отличие от оценок коэффициента диффузии магнитного поля, которые имели интегральный характер, оценки коэффициента турбулентной вязкости выполнены на основе локальных измерений двух компонент скорости, соответствующих тороидальному (вдоль канала) и полоидальному (в плоскости сечения канала) движению жидкости. Несмотря на то, что амплитуда полоидальной компоненты скорости почти на порядок меньше, амплитуда ее пульсаций существенно больше. Турбулентные пульсации на начальной стадии эволюции течения существенно анизотропны, в то время как на поздних стадиях турбулентные пульсации становятся изотропными. Можно сделать вывод, что увеличение коэффициента диффузии магнитного поля обусловлено в основном пульсациями полоидального поля скорости. Оценки турбулентной вязкости выполнялись с помощью известной из  $k$ - $\epsilon$ -модели формулы, связывающей турбулентную вязкость с энергией турбулентных пульсаций и скоростью диссипации энергии  $\nu_t \approx k^2/\epsilon$ .

ропны, в то время как на поздних стадиях турбулентные пульсации становятся изотропными. Можно сделать вывод, что увеличение коэффициента диффузии магнитного поля обусловлено в основном пульсациями полоидального поля скорости. Оценки турбулентной вязкости выполнялись с помощью известной из  $k$ - $\epsilon$ -модели формулы, связывающей турбулентную вязкость с энергией турбулентных пульсаций и скоростью диссипации энергии  $\nu_t \approx k^2/\epsilon$ .

На рис. 2а, б показаны соответственно графики изменения со временем энергии турбулентных пульсаций и вариации коэффициента турбулентной вязкости.

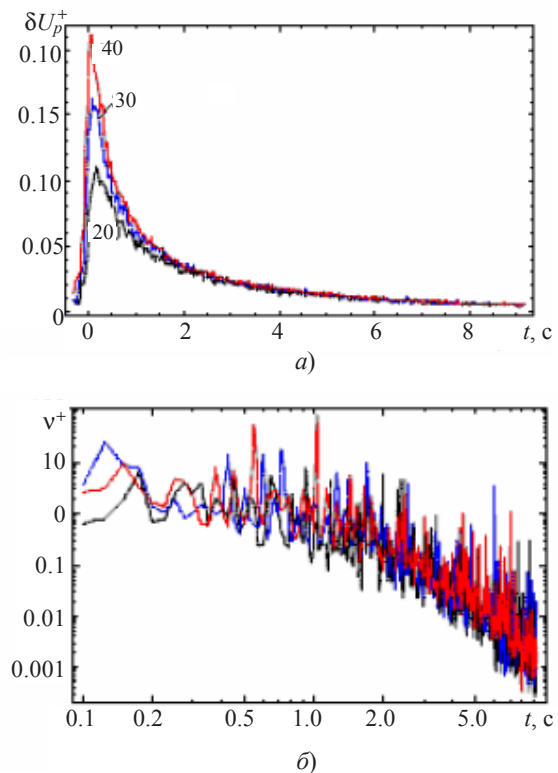


Рис. 2

Настоящие исследования выполнены совместно с Р.А.Степановым.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №11-01-00423.

### MEASURING TURBULENT TRANSPORT COEFFICIENTS IN NONSTATIONARY FLOWS OF LIQUID SODIUM

P.G. Frick, S.A. Denisov, V.N. Noskov

Direct measurements of turbulent viscosity and effective magnetic diffusivity in turbulent flows of electro-conductive fluids or moderate magnetic Reynolds numbers above unity are reported. The measurements are performed in a nonstationary turbulent flow of liquid sodium, generated in a closed toroidal channel. The peak level of Reynolds number reached the value of about 3000000, which corresponds to magnetic Reynolds number of about 30.

Keywords: turbulence, MHD-turbulence, turbulent transport, turbulent viscosity, turbulent magnetic diffusion.