

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИАМАГНЕТИЗМА В ПОТОКАХ ЖИДКОГО НАТРИЯ\*

П.Г. Фрик, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

С.А. Денисов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

В.И. Носков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Р.А. Степанов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН; Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

А.М. Павлинов, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Экспериментально изучено явление подавления магнитного поля сильно турбулизованным потоком жидкого натрия при средних магнитных числах Рейнольдса  $Rm > 10$ . Приложенное магнитное поле коллинеарно линиям тока крупномасштабного среднего потока, что исключает индукционные эффекты, обусловленные средним потоком, а также вклад турбулентной диффузии. Мы показываем, что на стадии высокой турбулизации потока среднее магнитное поле редуцируется до уровня 0,6 от начального. Наблюдаемый эффект может быть объяснен как результат турбулентного диамагнетизма, описываемого членом  $\text{rot}(\mathbf{g} \times \mathbf{B})$  уравнения индукции среднего поля (здесь  $\mathbf{g}$  – градиент энергии турбулентных флуктуаций, а  $\mathbf{B}$  – среднее магнитное поле).

**Ключевые слова:** магнитная гидродинамика, турбулентность, флуктуации, жидкий натрий, среднее магнитное поле, диамагнетизм.

### Введение

Интенсивная мелкомасштабная турбулентность в электропроводных жидкостях сопровождается целым набором индукционных эффектов, которые описываются в общем случае примерно 20 слагаемыми локальной индукционной электродвижущей силы [1]. Некоторые среди них могут быть изолированы и детально изучены в лабораторном эксперименте. В общем же случае это является очень непростой задачей. Здесь представлены результаты лабораторного исследования эффекта подавления магнитного поля в области сильных турбулентных флуктуаций: была выполнена серия экспериментов с неста-

ционарным турбулентным потоком жидкого натрия. Поток возникал в тороидальном быстро вращающемся канале после его резкой остановки. На него было наложено стационарное магнитное поле, коллинеарное линиям тока крупномасштабного среднего потока (тороидальная катушка с током). Это исключает как индукционные эффекты, обусловленные средним потоком, так и эффективный диффузионный вклад (бета-эффект).

### Экспериментальная установка

Используемый в эксперименте поток жидкого натрия создается в тороидальном канале из титанового сплава [2]. Ра-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Пермского края (грант № 14-01-96010).

диус осевой тора составляет  $R = 0,18$  м, а радиус поперечного сечения  $r_0 = 0,08$  м. Частоты вращения канала достигают 50 об/сек, а нестационарные турбулизованные потоки возникают при резких торможениях канала. Времена торможения канала составляют около 0,3 с, не превосходя этой величины. Скорость потока максимальна в момент остановки канала и составляла почти 70% линейной скорости канала перед торможением. Это означает, что максимальное число Рейнольдса  $Re = V \cdot r_0 / \nu$  превосходит  $3 \cdot 10^6$  и соответствует магнитному числу Рейнольдса  $Re_m \approx 30$ .

Для измерения скорости используется двухосевой локальный датчик [3]. Одна из осей датчика ориентирована в азимутальном направлении (вращение канала по часовой стрелке – тороидальное направление), другая – в радиальном (полоидальное) направлении. Он закреплен на стенке канала, диаметральной нижнему концу трубки (рис. 1, а) магнитного датчика (рис. 1, б).

Перед торможением жидкость покоится относительно стенок канала и движется как твердое тело. Далее, на всех стадиях торможения, скорости жидкости (тороидальная и полоидальная) нарастают относительно стенки канала от нуля и достигают максимума в момент прекращения вращения. В этот момент любая система отсчета, связанная с каналом,

становится инерциальной. Соответствующие переменные:  $V^{even} = (V^+ + V^-) / 2$  и  $V^{odd} = (V^+ - V^-) / 2$ , где  $V^+$  и  $V^-$  – скорости, генерируемые начальным вращением канала по и против часовой стрелки соответственно, усредненные по 20 «заездам», представлены на рис. 2. Генерация полоидальной скорости обеспечивается кривизной канала и становится более эффективной с увеличением его «толщины» [4]. Для максимальной скорости вращения  $\Omega = 50$  об/с отношение максимальных (конец торможения) полоидальной и тороидальной средних скоростей достигает  $V^{pol} / V^{tor} = 0,18$ . При этом максимальная тороидальная скорость  $V^{tor} = 0,69 V_0 = 39$  м/с, где  $V_0$  – скорость натрия на оси тора перед торможением (твердотельное вращение). Детально см. [3].

Катушка, навитая вокруг канала, питается стабилизированным постоянным током 20 а и создает тороидальное поле  $B_T \approx 13$  Гс на осевой тора. Трубка внутренним диаметром 10 мм пересекает канал вдоль диаметра, параллельного оси вращения (см. рис. 1, а) и используется для локальных и интегральных измерений магнитного поля. Измеряются все компоненты локального индуцированного поля  $\mathbf{b}$  с помощью 3D Холл-датчика (см. рис. 1, б), состоящего из CSA-1V чипов фирмы Sentron с магнитной чувствительностью 300 в/тл. Датчик позициони-

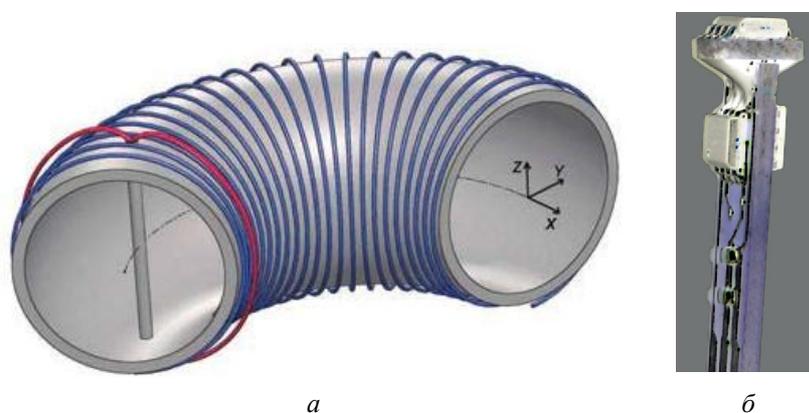


Рис. 1. Тороидальный канал схематично: трубка для магнитного датчика и измерительных катушек, тороидальная катушка с током, система отсчета, осевая тора (а); 3-компонентный датчик магнитного поля (б)

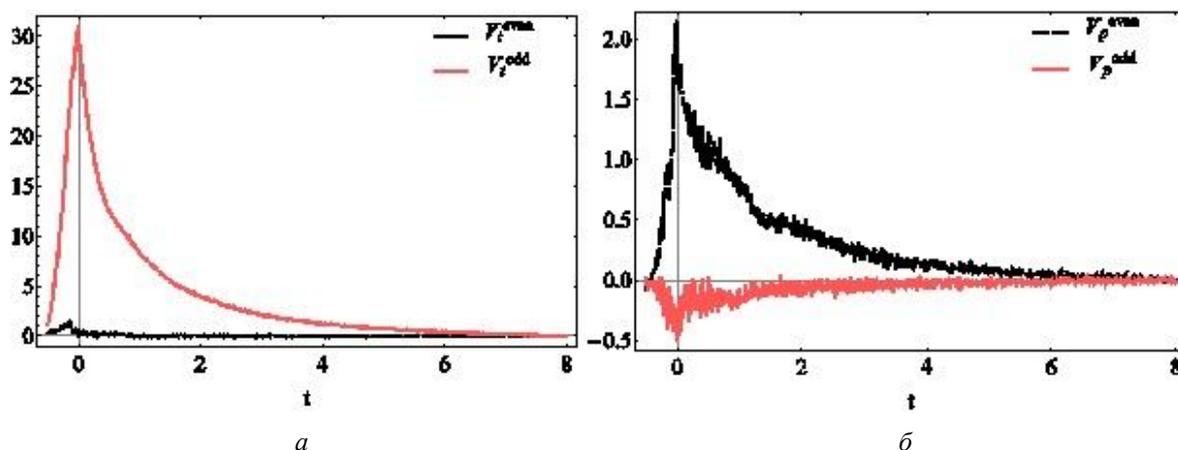


Рис. 2. Средние тороидальная (а) и полоидальная (б) скорости (м/с) для  $\Omega = 40$  об/с. Черная кривая – полусумма, красная – полуразность значений, при начальных вращениях тора по и против часовой стрелки

руется внутри трубки при различных значениях координаты  $z$ .

Для получения интегральных свойств магнитного поля используются две катушки, охватывающие обе половины поперечного сечения канала (см. рис. 1, выделены красным цветом). ЭДС катушек описывает эволюцию магнитного потока внутри:  $U_{coil} = -d\Phi/dt$ . Сигнал усиливается низкочастотным усилителем SR560 (Stanford Research Systems Inc., Sunnyvale, USA).

#### Характеристики магнитного поля

Для получения средних значений магнитного поля и его статистических свойств осуществляется по 10 измерений для каждого положения 3D датчика и каждого направления вращения канала (начальная скорость 40 об/с). Учет влияния постоянных внешних магнитных полей реализуется одной серией измерений с  $B_T = 0$ . Эволюция компонент индуцированного поля  $b_x$  и  $b_z$  при различных  $z$  координатах датчика представлена на рис. 3. Здесь момент  $t=0$  соответствует началу торможения, а координата  $z=0$  – центру поперечного сечения канала ( $z = \pm 80$  мм – левая и правая стенки).

Верхние панели на рис. 3 демонстрируют четную часть магнитного поля (относительно начального вращения) – полусумма сигналов противоположных вращений, нижние панели – нечетная часть

поля (полуразность сигналов). Главный эффект вытеснения магнитного поля ясен уже из эволюции  $B_x$ -компоненты. Он может быть интерпретирован как вытеснение магнитного поля из турбулентного ядра во внешнюю часть поперечного сечения канала. Менее информативно магнитное поле выглядит на  $B_z$ -графиках.

Взяв максимальные значения вытеснения  $B_x$ -компоненты продольного магнитного поля для каждого положения датчика можно восстановить распределение магнитного поля вдоль оси  $z$  в поперечном сечении тора (рис. 4).

Интегральные измерения указывают на сохранение полного магнитного потока сквозь поперечное сечение катушек. Это означает, что магнитное поле частично перемещается на периферию канала, где  $B_x$  должно возрастать. Однако это периферийное возрастание не наблюдается, следовательно, поле вытесняется в стенки канала.

Сравнение графиков рис. 5 дает информацию о причинах вытеснения магнитного поля: эволюция флуктуаций магнитного поля следует за эволюцией энергии пульсаций скорости, которые обусловлены турбулентностью потока. Теория среднего поля предсказывает, что магнитное поле должно выталкиваться из зоны интенсивной турбулентности в более спокойные области. В нашем случае это означает, что магнитное поле частич-

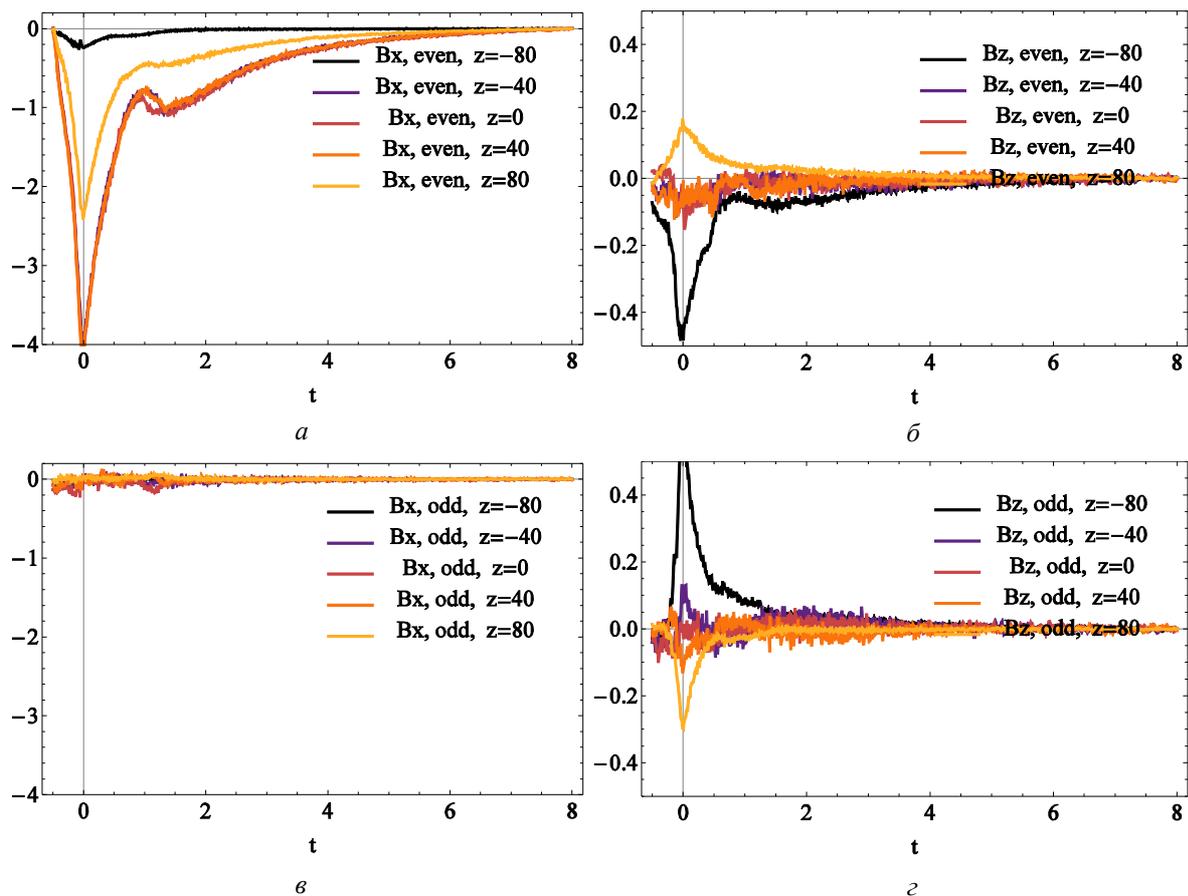


Рис. 3. Эволюция локального магнитного поля ( $B_x$ ) в различных точках оси  $z$ : полусумма (а, б), полуразность (в, г) результатов измерений, полученных при начальном вращении тора по и против часовой стрелки

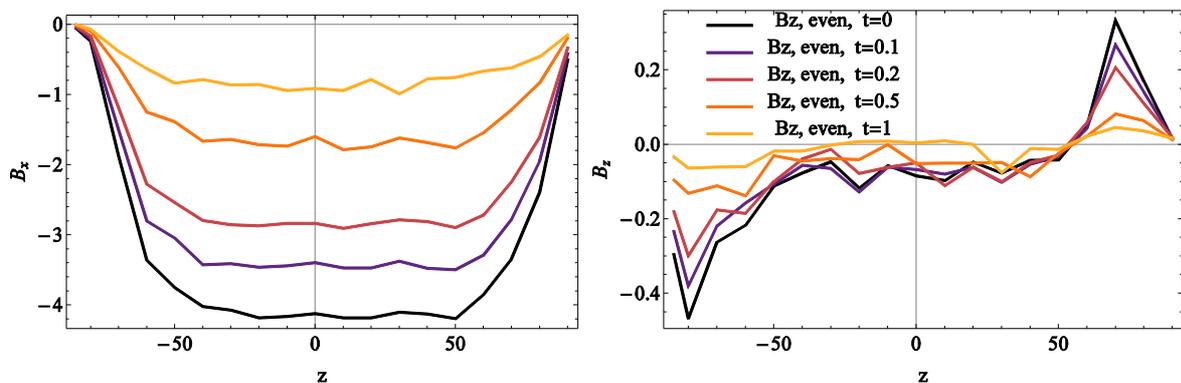


Рис. 4. Профили компонент магнитного поля ( $B_x$ ) в последовательные моменты времени после начала торможения (вычтены начальные значения)

но может быть перенесено к границе канала или даже в стенку, так что мы не сможем наблюдать возрастание поля с помощью локального датчика из-за его конструктивных особенностей.

Независимые измерения ЭДС двух катушек позволяют оценить среднее магнитное поле на обеих половинах попереч-

ного сечения канала (рис. 6).

Прежде всего, значительных изменений полного магнитного потока вдоль канала не наблюдается: возрастание же порядка 1 гс объясняется как результат адвекции неоднородного магнитного поля, обусловленной неплотностью катушки тороидальной катушки. Эта величина соответствует

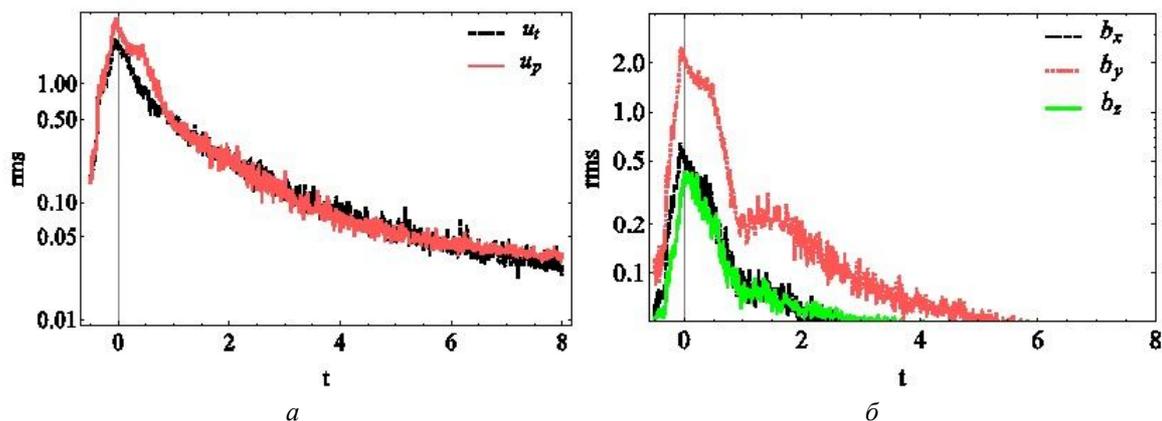


Рис. 5. Флуктуирующая часть тороидальной и полоидальной скоростей (м/с) (а) и компонент локального магнитного поля (гс) (б)

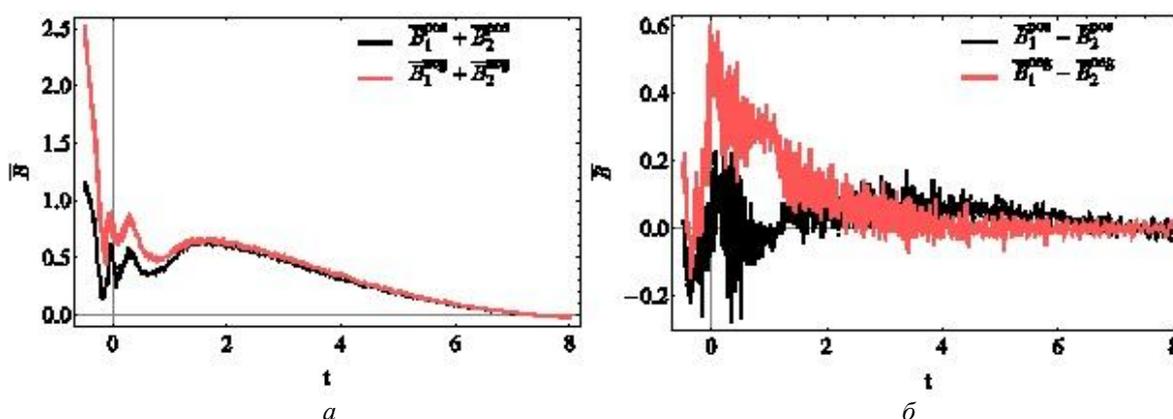


Рис. 6. Сумма (а) и разность (б) полей (гс), полученных с помощью измерительных катушек. Прерывистая и сплошная линии соответствуют начальным вращениям тора по и против часовой стрелки соответственно

результатам измерений  $B_z$ -компоненты, которые вызваны этим же эффектом. Второй интересный результат имеем для невязки магнитного потока двух катушек (см. рис. 6, б). Сильные флуктуации здесь объясняются как результат вихрей Кармана, которые генерируются потоком около трубки, вставленной в канал. Эти вихри порождают сильные затухающие по потоку осцилляции, имеющие частоту, пропорциональную отношению средней скорости потока к радиусу трубки.

#### Библиографический список

1. Raedler K.-H., Stepanov R. Mean electromotive force due to turbulence of a conducting fluid in the presence of mean flow // Phys. Rev. E. – 2006. – Vol. 73. – P. 056311.
2. Frick P., Noskov V., Denisov S., Stepanov R. Direct Measurement of Effective Magnetic Diffusivity in Turbulent Flow of Liquid Sodium // Phys. Rev. Lett. – 2010. – Vol. 105. – № 18. – P. 184502.
3. Noskov V. [et al.] Dynamics of a turbulent spin-down flow inside a torus // Phys. Fluids. – 2009. – Vol. 21. – № 4. – P. 045108.

#### Заключение

Наши измерения показывают, что на стадии высокой турбулизации потока среднее магнитное поле уменьшается до уровня 0,6 от начального. Наблюдаемый эффект может быть объяснен как результат турбулентного диамагнетизма, описываемого слагаемым  $\text{rot}(\mathbf{g} \times \mathbf{B})$  в уравнении индукции среднего поля (здесь  $\mathbf{g}$  – градиент энергии турбулентных флуктуаций потока, а  $\mathbf{B}$  – среднее магнитное поле).

4. Frick P., Noskov V., Denisov S., Stepanov R. Turbulent viscosity and turbulent magnetic diffusivity in a decaying spin-down flow of liquid sodium // Phys. Rev. E. – 2012. – Vol. 85. – № 1. – P. 016303.

**EXPERIMENTAL STUDY OF TURBULENT DIAMAGNETISM  
IN A LIQUID SODIUM FLOW**

P.G. Frick<sup>1</sup>, S.A. Denisov<sup>1</sup>, V.I. Noskov<sup>1</sup>, R.A. Stepanov<sup>1,2</sup>, A.M. Pavlinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University

The phenomenon of magnetic field suppression by a turbulized flow of liquid sodium at medium Reynolds magnetic numbers  $R_m > 10$  was experimentally studied. The magnetic field is applied collinearly to streamlines of a large-scale mean flow, which excludes the induction effects due to the average flow, as well as the contribution of turbulent diffusion. We show that at the stage of high turbulence, the mean magnetic field is reduced to 0.6 of the initial one. The observed effect can be explained as a result of turbulent diamagnetism, described by a term  $\text{rot}(\mathbf{g} \times \mathbf{B})$  of the mean-field induction equation (here  $\mathbf{g}$  is the gradient of the energy of turbulent fluctuations and  $\mathbf{B}$  is the mean magnetic field).

*Keywords:* magnetohydrodynamics, turbulence, fluctuations, liquid sodium, mean magnetic field, diamagnetism.

**Сведения об авторах**

*Фрик Петр Готлобович*, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физической гидродинамики, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: frick@icmm.ru

*Денисов Сергей Анатольевич*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: denisov@icmm.ru

*Носков Виталий Иванович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: nskv@icmm.ru

*Степанов Родион Александрович*, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; профессор кафедры математического моделирования систем и процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: rodion@icmm.ru

*Павлинов Александр Михайлович*, аспирант лаборатории физической гидродинамики, ИМСС УрО РАН; e-mail: pam@icmm.ru

*Материал поступил в редакцию 21.10.2016 г.*