

# Температурные пульсации при течении жидкого металла в прямоугольном канале под влиянием компланарного магнитного поля

Н. Ю. Пятницкая<sup>1,2</sup>, П. А. Сардов<sup>2</sup>, Е. А. Галлямова<sup>2</sup> и Н. Г. Разуванов<sup>1</sup>

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

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

E-mail: piatnitskyany@mpei.ru

Статья поступила в редакцию 8 августа 2019 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается течение жидкого металла в прямоугольном канале под воздействием компланарного магнитного поля и симметричного теплового потока. Представлены результаты экспериментов по исследованию эволюции интенсивности пульсаций температуры по длине канала. Измерения характеристик пульсаций температуры проводились во всех областях течения: область неоднородного магнитного поля и обогрева, начальный гидродинамический участок, область стабилизированного течения и однородного магнитного поля с обогревом. Помимо развития интенсивности температурных пульсаций по длине, представлено развитие профилей этой статистической характеристики в сечении канала с изменением индукции магнитного поля. Экспериментальный режим, представленный в статье, характеризуется смешанной конвекцией, т.е. в этой области режимных параметров значимое влияние на теплообмен оказывает и свободная конвекция и вынужденное течение жидкости. <https://doi.org/10.33849/2019211>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Жидкометаллическая концепция охлаждения термоядерных реакторов является предметом для экспериментального и численного исследования. На данный момент существует несколько проектов охлаждения ИТЭР (международного экспериментального термоядерного реактора) жидким металлом, в одном из которых течение эвтектики Pb-Li осуществляется в прямоугольных каналах с соотношением сторон 1/3 [1]. Научная группа МЭИ–ОИВТ РАН в течение многих лет занимается изучением процессов гидродинамики и теплообмена при течении жидких металлов в каналах различных форм в условиях, которые приближены к реальным в вышеупомянутых проектах [2]. Совместное воздействие сильного магнитного поля (МП) и сил плавучести проявляется возникновением неожиданных режимов течения, которые сопровождаются аномально высокими колебаниями температуры [3]. Проведение широкомасштабных разносторонних исследований (численных и экспериментальных) [2] является необходимостью для проектирования и создания установок, использующих жидкометаллическое охлаждение.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И КОНФИГУРАЦИЯ ТЕЧЕНИЯ

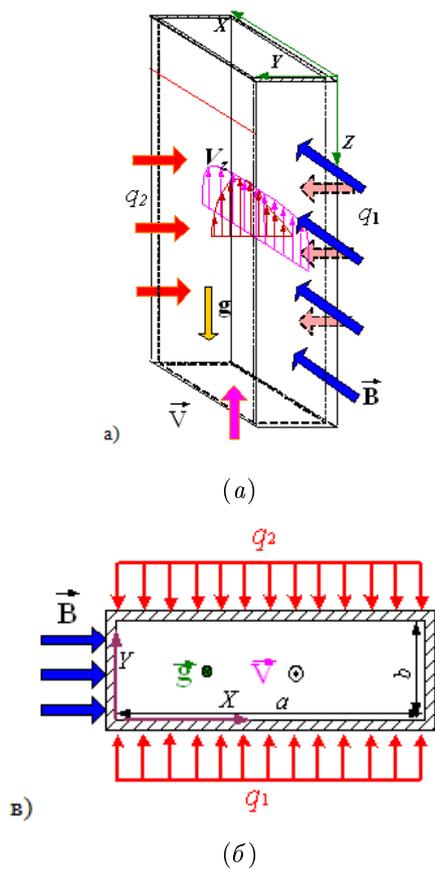
Эксперименты проводились на уникальном ртутном стенде МЭИ–ОИВТ РАН (РК-2). Здесь мы не будем подробно останавливаться на описании этой установки, оно приведено в работах [3–5], скажем лишь об основных параметрах и конфигурации течения, показанных на рисунке 1.

Рассматривается подъемное течение жидкого металла в прямоугольном канале в компланарном МП в условиях двустороннего обогрева. Такая конфигурация течения является случаем устойчивой стратификации плотности, в отличие от опускного течения [5, 6]. Компланарное МП — это поперечное поле, направленное вдоль длинной стороны плоского канала, однако в нашем случае мы используем этот термин для пря-

моугольного канала с соотношением сторон 1:3. Числа Рейнольдса, Пекле, Гартмана, Грасгофа и Ричардсона в экспериментах имели следующие значения:  $Re = Ud/\nu = (10-50) \times 10^3$ ,  $Pe = Ud/\chi = 250-1250$ ,  $Ha = Bd\sqrt{\sigma/\rho\nu} = 0-800$ ,  $Gr = g\beta q_c d^4/\lambda\nu^2 = 1.1 \times 10^8$ ,  $Ri = Gr/Re^2 = 0.2-5$ . Здесь  $U$  — средняя по сечению скорость,  $d$  — гидравлический диаметр,  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,  $\sigma$  — электропроводность ртути,  $\beta$  — коэффициент объемного термического расширения ртути,  $q_c$  — тепловой поток на стенке,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИЙ

В работе представлены экспериментальные данные по измерению статистических характеристик пульсаций температуры: осциллограммы, частотный спектр и интенсивность пульсаций температуры. Интенсивность температурных пульсаций  $\sigma$  определена как квадратный корень из дисперсии  $\sigma^2$ , что есть среднеквадратичное отклонение температуры от осредненного значения в точке потока. На рисунке 2 показано изменение профилей интенсивности пульсаций температуры в сечении канала для двух плоскостей X и Y. Экспериментальные данные представлены для режима, в котором свободная конвекция оказывает существенное влияние на теплообмен ( $Re = 30000$ ,  $q_c = 25/25$  кВт/м<sup>2</sup>). Профиль интенсивности температурных пульсаций как вдоль оси Y, так и вдоль оси X везде принимает "М-образную" (с двумя максимумами) форму. В МП пульсации немного снижаются, но остаются на высоком уровне и в большинстве случаев остаются себе подобными, т.е. сохраняют форму [6]. На рисунке 3 при разных значениях числа Гартмана показаны осциллограммы пульсаций в районе максимума интенсивности ( $Y = 0.12$ ,  $z/d = 24.0$ ). С увеличением магнитной индукции амплитуда пульсаций сначала снижается ( $Ha = 300$ ), однако при числе  $Ha = 500$  амплитуда пульсаций увеличивается до вели-



**Рисунок 1.** Исследуемая конфигурация МГД-теплообмена (а) и система координат (б) в прямоугольном канале.

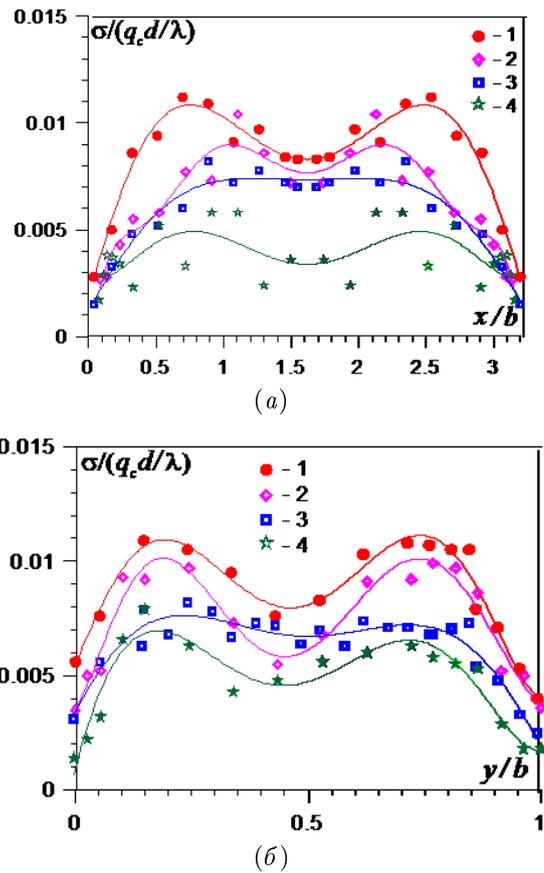
чины, соответствующей режиму  $Ha = 0$  и затем снова снижается при  $Ha = 800$ .

Такой режим течения представляет собой смешанную конвекцию [7], при которой силы плавучести оказывают заметное влияние на поток при числах Гартмана, которые соответствуют полному подавлению турбулентности, т.е. ламинарному течению. По всей видимости, при числах Гартмана, соответствующих полному подавлению турбулентности, начинают развиваться вторичные течения, вносящие существенный вклад в характер и величину амплитуды пульсаций.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ПО ДЛИНЕ КАНАЛА С ПОМОЩЬЮ ЗОНДОВОГО МЕТОДА

Исследования основных статистических характеристик по длине канала представляют особый интерес, т.к. позволяют сделать выводы о длине начального термического участка и характере влияния областей неоднородного обогрева и магнитного поля на гидродинамику и теплообмен. Такие исследования были проведены с помощью продольного зонда, механизм которого подробно описан в [8].

Эволюция интенсивности температурных пульсаций по длине канала показана на рисунке 4 в трех характерных точках: в центре канала (рисунок 4(а)), в районе максимума (рисунок 4(б)) и непосредственно на поверх-



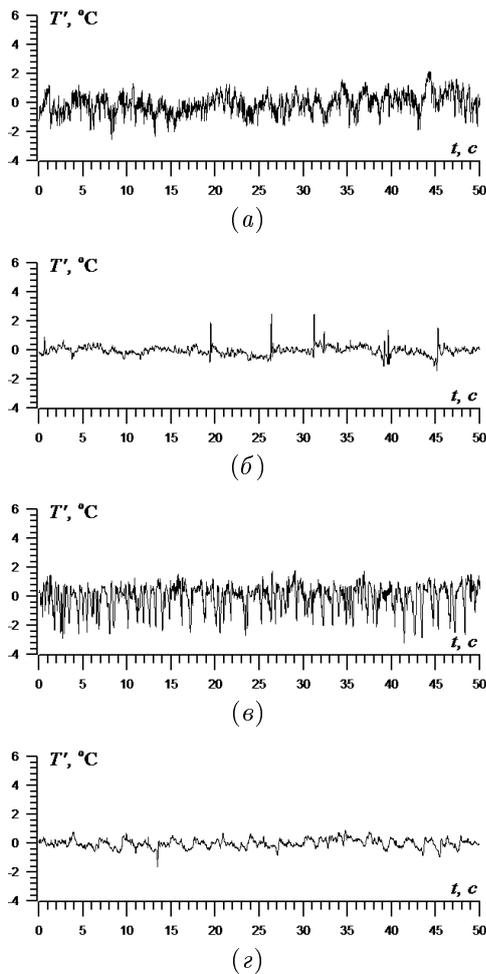
**Рисунок 2.** Профили безразмерной интенсивности пульсаций по оси X (а) и Y (б) в сечении  $z = 21d$ ,  $q_c = 25/25$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30000$ , 1)  $Ha = 0$ ; 2)  $Ha = 300$ , 3)  $Ha = 500$ , 4)  $Ha = 800$ .

ности стенки (рисунок 4(в)). Для наглядного представления расположения области неоднородного и однородного магнитного поля относительно длины канала на рисунке 4(з) приведена эпюра.

Как правило, в отсутствие магнитного поля длины опытного участка (1 метр) хватает для стабилизации потока и подобная картина наблюдается в большинстве режимов. Однако, при появлении магнитного поля характер развития интенсивности температурных пульсаций невозможно предсказать. Интенсивность пульсаций на рисунке 4(а,б) сначала растет, но затем при  $z/d = 5$ , где поток жидкого металла входит в область однородного магнитного поля, она начинает снижаться и выходит на постоянный уровень. Причем в МП интенсивность пульсаций ниже, чем при отсутствии МП. В некоторых режимах при наличии МП ( $Ha = 300, 500$ ) интенсивность пульсаций начинает возрастать при  $z/d = 17$ .

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемая в данной работе геометрия является перспективной для некоторых проектов охлаждения blankets ИТЭР. Данная работа была направлена на первичное исследование эволюции интенсивности пульсаций по длине канала в разных областях магнитного поля и обогрева. Был рассмотрен широкий диапазон режимных параметров и во многих режимах термогравитационная конвекция приводит к значительным изменениям структуры потока при полном подавлении тур-



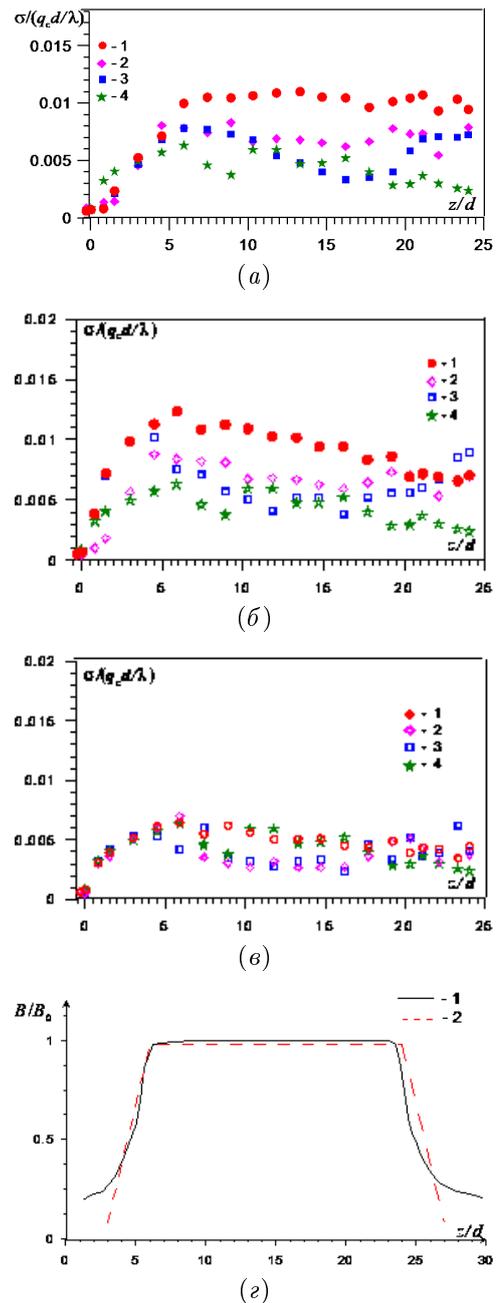
**Рисунок 3.** Осциллограммы вблизи обогреваемой стенки  $Y = 0.12$ ,  $q_c = 25/25$  кВт/м<sup>2</sup>,  $Re = 30000$ ,  $z/d = 24.0$ : а)  $Ha = 0$ , б) 300, в) 500, г) 800.

булентности, об этом говорит анализ осциллограмм температурных пульсаций. В реальных установках такие эффекты могут негативно сказаться на эффективности каналов охлаждения. Кроме того, необходимо проводить дополнительные исследования динамики развития пульсаций по длине канала при больших числах Гартмана и большей длине канала. Результаты исследования характера изменения интенсивности пульсаций по длине оказались неоднозначными, что требует дополнительного изучения смешанной конвекции при выраженном влиянии магнитного поля и вторичных течений в области стабилизированного течения и однородного магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-38-00894.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leshukov *et al* 2012 *Fusion Engineering and Design* **87** 1487–1494
2. Батенин В М, Беляев И А, Свиридов В Г, Свиридов Е В и Листратов Я И 2015 *Теплофизика высоких температур* **53** 934–934
3. Belyaev I A, Genin L G, Listratov Y I, Melnikov I A, Sviridov V G, Sviridov E V, Ivochkin Y P, Razuванov N G and Shpansky Y S 2013 *Magnetohydrodynamics* **49** 177–190
4. Melnikov I A, Sviridov E V, Sviridov V G and Razuванov



**Рисунок 4.** Профили интенсивности температурных пульсаций по длине канала,  $Re = 30000$ ; а) в центре канала, б) в районе максимума пульсаций, в) вблизи стенки, г) эпюра магнитного поля. 1)  $Ha = 0$ , 2)  $Ha = 300$ , 3)  $Ha = 500$ , 4)  $Ha = 800$ .

5. Razuванov N G, Sviridov V G, Sviridov E V, Belyaev I A, Pyatnitskaya N Y and Zagorsky V S 2016 *Magnetohydrodynamics* **52** 171–180
6. Belyaev I A, Mel'nikov I A, Pyatnitskaya N Y, Razuванov N G and Sviridov E V 2018 *Thermal Engineering* **65** 911–915
7. Belyaev I A, Belavina E A, Kotlyar A V, Listratov Y I and Sviridov V G 2018 Heat transfer in mixed convection of molten salt in the presence of magnetic fields *Journal of Physics: Conference Series* vol 1133 p 012034
8. Belyaev I A, Biryukov D A, Pyatnitskaya N Y, Razuванov N G, Sviridov E V and Sviridov V G 2019 *Thermal Engineering* **66** 377–387