

Л.Г. Генин¹, В.Г. Свиридов¹, Д.И. Дорофеев¹,
В.Г. Жилин², Ю.П. Ивочкин², Н.Г. Разуванов²

Московский энергетический институт (технический университет), Россия (1)
Объединенный институт высоких температур РАН – ИВТ РАН, Москва, Россия (2)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПО ДЛИНЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ В УСЛОВИЯХ ОДНОСТОРОННЕГО ОБОГРЕВА

АННОТАЦИЯ

Проведены экспериментальные исследования теплообмена жидкого металла (ЖМ) по длине горизонтальной трубы с неоднородным по периметру обогревом в магнитном поле (МП). Эксперимент приближен к условиям термоядерного реактора типа ТОКАМАК. Измерены трехмерные поля осредненной температуры, распределения локальных и средних коэффициентов теплоотдачи. Наблюдалось значительное влияние термогравитационной конвекции (ТГК) на поля температуры и теплоотдачу в горизонтальной трубе. Влияние продольного и поперечного МП на характеристики теплоотдачи существенно различно.

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при течении ЖМ проводились на экспериментальном МГД-комплексе МЭИ-ИВТ РАН. Он объединяет два жидкометаллических стенда, позволяющих исследовать теплообмен ЖМ как в продольном, так и в поперечном МП. Детальные исследования МГД-теплообмена первоначально проводились на стенде МЭИ в продольном магнитном поле [1, 2]. Наблюдалось сильное влияние ТГК на поля температуры и распределения коэффициентов теплоотдачи. ТГК приводила к интенсификации теплоотдачи в горизонтальной обогреваемой трубе. При наличии *продольного* МП эффекты ТГК усиливались, средние по периметру сечения трубы числа Нуссельта* не снижались, несмотря на подавление турбулентности. Предварительные исследования показали, что влияние *поперечного* МП существенно отличается от продольного. Детальные исследования в *поперечном* МП в настоящее время проводятся на стенде ИВТ РАН.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В данной работе рассматривается крайний случай неоднородного по периметру обогрева: односторонний обогрев – тепловой поток только на одной стороне ($q_1 \neq 0, q_2 = 0$). Схема такого течения показана на рис. 1.

Ряд параметров экспериментальной установки:

- рабочая жидкость – ртуть;
- внутренний диаметр трубы – $d=19$ мм,
- длина зоны обогрева $l/d=42$.

* – здесь и ниже под средними Nu подразумеваются средние по периметру сечения трубы значения

Числа Рейнольдса, Гартмана и Рэлея в экспериментах имели следующие значения:

$$Re = 5000 \div 120000;$$

$$Na = 0 \div 500;$$

$$Ra = (g \beta \rho c_p q d^4 / (\lambda \nu)) = 0 \div 5 \cdot 10^6.$$

Измерения проводились зондом типа «гребенка», состоящим из девяти медно-константановых термопар. Температура стенки трубы измерялась крайними термопарами зонда, непосредственно соприкасающимися с ней. Такой способ дает большую точность по сравнению с использованием термопар, заделанных в стенку.

Эксперимент был полностью автоматизирован.

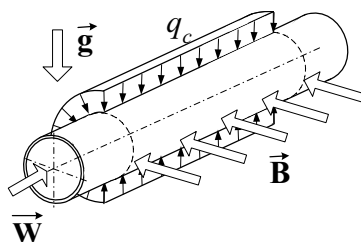


Рис. 1.
Исследуемая
конфигурация
МГД-теплообмена

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

В горизонтальной обогреваемой трубе ТГК оказывает значительное влияние на теплообмен ЖМ. Возникающие вторичные течения приводят к нарушению осевой симметрии полей температуры, при этом локальные коэффициенты теплоотдачи сильно изменяются по периметру поперечного сечения трубы.

Рассмотрим влияние *продольного* МП на теплообмен в горизонтальной трубе с неоднородным обогревом. Так как МП подавляет турбулентность, то можно было бы ожидать снижения числа Нуссельта до значения, соответствующего ламинарному режиму течения. Однако в наших условиях средние по периметру сечения трубы значения числа Нуссельта оказываются выше значений, соответствующих не только ламинарному, но и турбулентному режиму течения. Здесь решающую роль играет ТГК, которая усиливается продольным МП и компенсирует снижение теплоотдачи из-за подавления турбулентности. Как видно на рис. 2, средние по периметру сечения трубы значения числа Нуссельта в продольном МП ($Na=450$) оказываются не

ниже значений, полученных в отсутствие МП. Сплошной линией на графике показана зависимость, получена в МЭИ [3]:

$$Nu_T = 7 + 0.025Pe^{0.8} + 0.006 \left(\frac{1-x}{Pe d}\right)^{-1.2}, \quad (1)$$

представляющая собой формулу Лайона с поправкой на начальный термический участок.

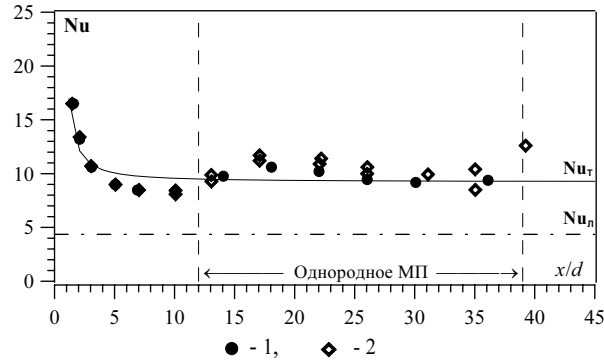


Рис. 2. Изменение осредненного по периметру сечения трубы числа Нуссельта по длине в продольном магнитном поле (односторонний обогрев): $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 450, $Re=10000$, $Ra=1.0 \cdot 10^6$

Если средние числа Нуссельта мало отличаются от зависимости (1), то локальные могут сильно отличаться от нее. На рис. 3 показано изменение безразмерной разности температуры стенки и средне-массовой температуры в данном сечении

$$\Theta_c = \frac{T_c(\varphi, X) - T_{ж}(X)}{q_c d / \lambda}$$

на верхней и нижней образующих по длине трубы при различных числах Гартмана. Отметим, что Θ_c – величина, обратная локальному числу Нуссельта $\Theta_c = 1 / Nu(\varphi, X)$.

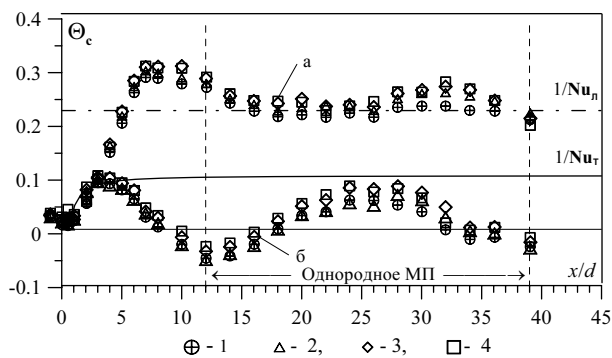


Рис. 3. Изменение безразмерной температуры стенки на верхней (а) и нижней (б) образующих по длине трубы в продольном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=10000$, $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 150, 3 – 300, 4 – 450

В поведении $\Theta_c(x/d)$ наблюдается ярко выраженная немонотонность, связанная с особенностями развития вторичного вихревого течения ТГК при одностороннем обогреве, слабо зависящая от продольного МП [2]. Необходимо отметить, что локальные значения Nu могут быть ниже значений для ламинарного течения. Такая ситуация возможна и при однородном обогреве [4].

Характерные поля температуры в сечении потока показаны на рис. 4. Такой вид полей температуры связан с наличием вторичного вихря ТГК с осью, параллельной оси трубы. В этом проявляется существенное отличие от случая однородного обогрева, так как там формировались два симметричных вихря. Также видно, что под воздействием *продольного* МП поле температуры становится все более несимметричным относительно осевой горизонтальной плоскости.

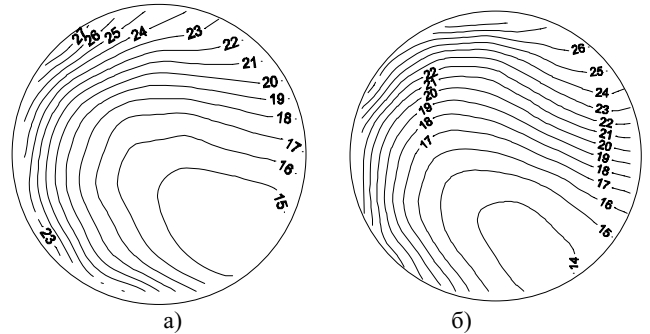


Рис. 4. Поля осредненной температуры в сечении трубы $x/d=37$ в продольном магнитном поле (односторонний обогрев): $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, а) – $Ha=0$, б) – 450, $Re=35000$

Рассмотрим теперь ситуацию, наблюдаемую в *поперечном* магнитном поле. Влияние поперечного МП на изотермическое течение ЖМ проявляется в виде двух эффектов: подавления турбулентности и уплощения профиля скорости в плоскости, параллельной вектору индукции МП (эффекта Гартмана).

Если продольное МП усиливает влияние ТГК, то поперечное МП, напротив, должно его ослаблять. Но это происходит не всегда, о чем свидетельствуют представленные ниже данные.

Рассмотрим график изменения среднего числа Nu , представленный на рис. 5. Здесь точки 1, соответствующие значениям Nu в отсутствие МП сначала монотонно снижаются, затем, начиная с $x/d \approx 8$ начинают несколько возрастать, выходя на горизонтальную асимптоту. Такой характер поведения (так же, как и на рис. 2) объясняется формированием вихря ТГК, который приводит к некоторой интенсификации теплоотдачи в горизонтальной трубе.

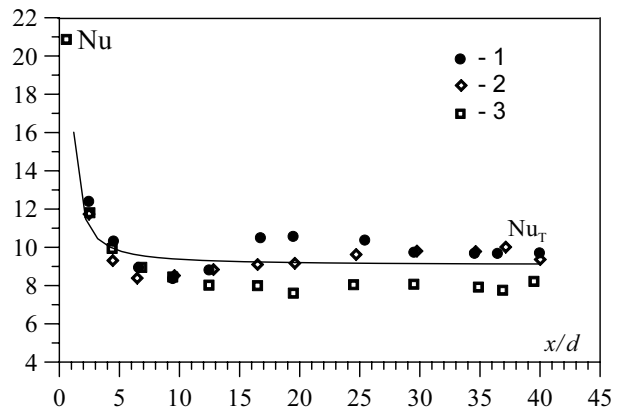


Рис. 5. Изменение осредненного по периметру сечения трубы числа Нуссельта по длине в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=10000$, $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 100, 3 – 320

Поперечное МП подавляет турбулентность и теплоотдача ухудшается. В сильном МП ($Ha=320$) средние Nu монотонно снижаются по длине участка обогрева, выходя на горизонтальную асимптоту.

Значения безразмерной локальной температуры стенки на верхней и нижней образующих в поперечном МП показаны на рис. 6. Их поведение также сильно отличается от случая течения в продольном МП. При малых числах Рейнольдса ($Re \sim 10000$), когда влияние ТГК относительно велико, оно остается существенным и в поперечном МП. При этом характерная немонотонность в распределении безразмерной локальной температуры стенки на верхней и нижней образующих по длине рабочего участка также наблюдается, но имеет несколько иной характер.

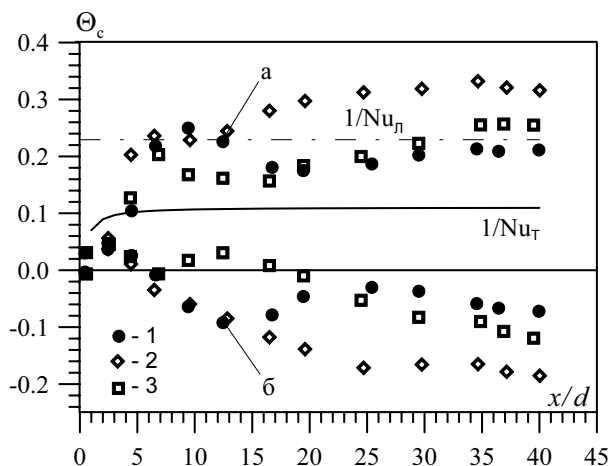


Рис. 6. Изменение безразмерной температуры стенки на верхней (а) и нижней (б) образующих по длине трубы в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=10000$, $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 100, 3 – 320

Поперечное МП оказывает неоднозначное влияние на характер теплообмена. С одной стороны, за счет подавления турбулентности и ламинаризации потока возрастают градиенты температуры, а следовательно, ТГК активизируется. Этот эффект является преобладающим при сравнительно небольших значениях числа Гартмана. Так, при $Ha=100$ разность между температурами на верхней и нижней образующей трубы возрастает (рис. 6).

С другой стороны, поперечное МП подавляет не только турбулентность, но и вторичные течения ТГК. С ростом числа Гартмана этот эффект становится все значительней, с чем связано уменьшение разности между температурами на верхней и нижней образующих ($Ha=320$ на рис. 6).

Известно, что поперечное МП приводит к уплотнению профиля скорости в плоскости, параллельной МП (эффект Гартмана), а в плоскости перпендикулярной полю профиль скорости становится более вытянутым. Вследствие этого (как и вследствие ТГК) коэффициент теплоотдачи становится неоднородным по периметру сечения трубы.

Рассмотрим данные при числе Рейнольдса $Re=35000$, представленные графиками на рис. 7–8.

В отсутствие МП развитие ТГК затягивается по сравнению с $Re=10000$ (точки 1 на рис.5 и 7). В МП теплоотдача монотонно снижается. При больших значениях числа Гартмана ($Ha=320$) средние числа Нуссельта выходят на горизонтальную асимптоту $Nu \sim 7$, что наблюдалось и при однородном обогреве [4]. При этом тепловая стабилизация течения наступает значительно раньше – уже при $x/d \sim 15$ (рис. 7). Необходимо отметить, что похожий эффект наблюдался и в случае однородного обогрева [3].

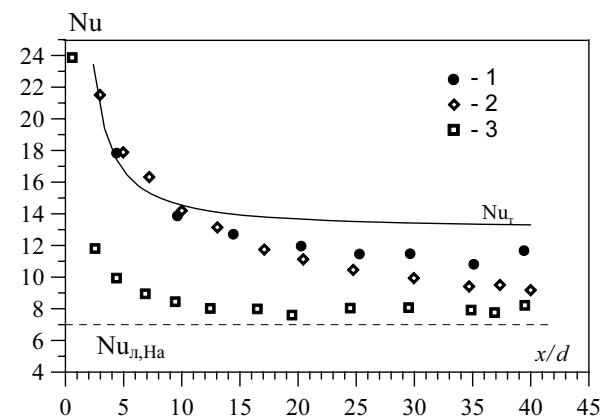


Рис. 7. Изменение осредненного по периметру сечения трубы числа Нуссельта по длине в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=35000$, $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 100, 3 – 320

Характерные поля температуры в сечении потока $x/d=40$ показаны на рис. 9. В данном случае в поперечном МП, за счет подавления ТГК поле температуры становится симметричным относительно осевой горизонтальной плоскости. То есть имеет место эффект противоположный тому, который наблюдался в продольном МП (рис. 4).

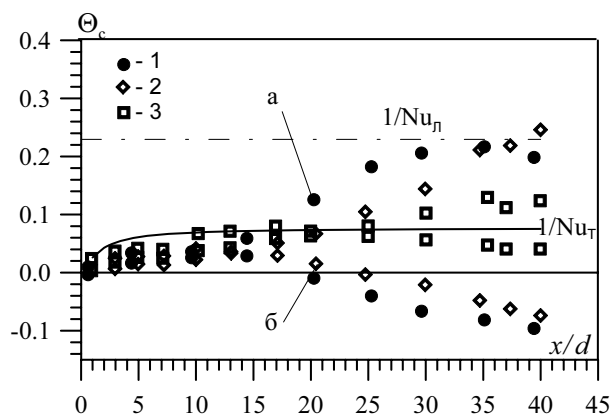


Рис. 8. Изменение безразмерной температуры стенки на верхней (а) и нижней (б) образующих по длине трубы в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=35000$, $q_1=35 \text{ кВт/м}^2$, $q_2=0 \text{ кВт/м}^2$, 1 – $Ha=0$, 2 – 100, 3 – 320

Рассмотрим ситуацию при больших числах Рейнольдса ($Re \sim 75000$), ей соответствуют рис. 10 – 11. Здесь, в отсутствие МП влияние ТГК практически не наблюдается. Средние числа Нуссельта (рис. 10) хорошо согласуются с зависимостью (1).

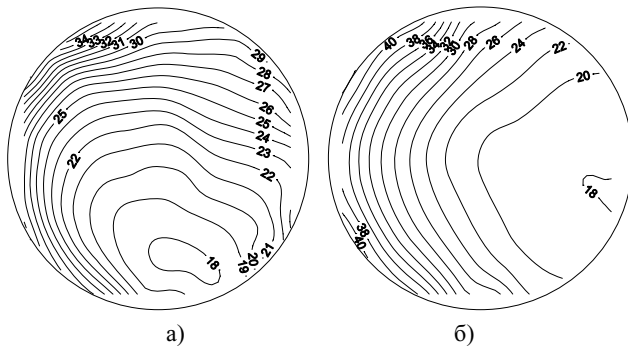


Рис. 9. Поля осредненной температуры в сечении трубы $x/d=40$ в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=35000$, $q_1=35$ кВт/м², $q_2=0$ кВт/м², а) – $Ha=0$, б) – 320

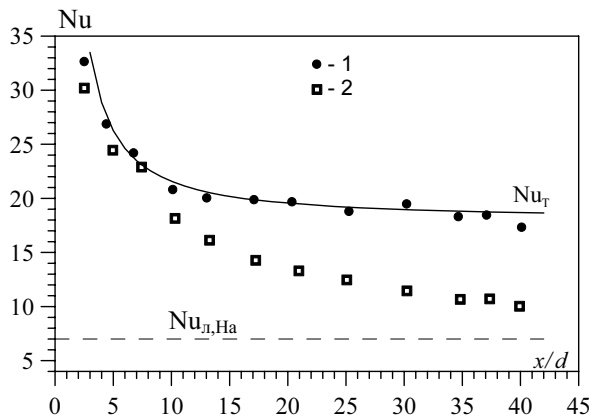


Рис. 10. Изменение осредненного по периметру сечения трубы числа Нуссельта по длине в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев), $Re=75000$, $q_1=35$ кВт/м², $q_2=0$ кВт/м²: 1 – $Ha=0$, 2 – 320

Значения локальной безразмерной температуры стенки на верхней и нижней образующих трубы практически совпадают (рис. 11). В поперечном МП влияние ТКК также отсутствует. Вследствие ламинаризации течения растет длина начального термического участка.

Представленные результаты получены впервые и могут быть полезны при проектировании жидкометаллических теплообменников blankets и дивертора реактора-токамака.

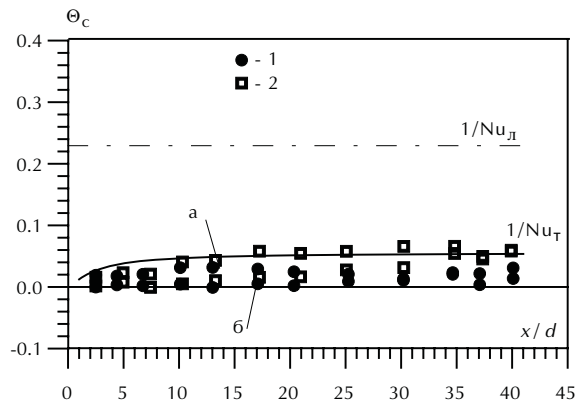


Рис. 11. Изменение безразмерной температуры стенки на верхней (а) и нижней (б) образующих по длине трубы в поперечном магнитном поле (односторонний обогрев): $Re=75000$, $q_1=35$ кВт/м², $q_2=0$ кВт/м², 1 – $Ha=0$, 2 – 320

Работа поддержана грантами РФФИ и Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное исследование теплоотдачи при течении жидкого металла в горизонтальной трубе в продольном и поперечном магнитных полях в условиях неоднородного по периметру обогрева / Л.Г. Генин, В.Г. Свиридов, О.Н. Иванова и др. // Труды III Российской национальной конференции по теплообмену. М., 2002. Т. 2. С. 118–121.
2. Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Устинов А.В. Влияние свободной конвекции на теплоотдачу по длине горизонтальной обогреваемой трубы в потоке жидкого металла в продольном магнитном поле // Труды II Российской национальной конференции по теплообмену. М., 1998. Т. 3. С. 147–151.
3. Генин Л.Г., Кудрявцева Е.В., Пахотин Ю.А., Свиридов В.Г. Температурные поля и теплоотдача при турбулентном течении жидкого металла на начальном термическом участке // Теплофизика высоких температур. 1978. Т. 16. № 6. С. 1243–1249.
4. Экспериментальное исследование развития теплообмена по длине трубы при течении жидкометаллического теплоносителя в поперечном магнитном поле / Л.Г. Генин, В.Г. Жилин, Ю.П. Ивочкин и др. // Теплоэнергетика. 2004. № 3. С. 17–29.