

С.А. Рыжкова, А.В. Комарова, В.Г. Свиридов, Н.Г. Разуванов

Московский энергетический институт (технический университет), Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ОБОГРЕВОМ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

АННОТАЦИЯ

Проведены экспериментальные исследования развития теплообмена жидкого металла в горизонтальной обогреваемой трубе в поперечном магнитном поле (МП). Эксперимент приближен к условиям теплообменных каналов термоядерного реактора типа ТОКАМАК. Обогрев был однородным по длине и в общем случае неоднородным по периметру сечения трубы. Измерены трехмерные поля осредненной температуры, распределения локальных и средних по периметру сечения трубы коэффициентов. Наблюдалось значительное влияние термогравитационной конвекции (ТГК) на поля температуры и теплоотдачу в горизонтальной трубе. Поперечное МП существенно влияет на теплообмен в этих условиях.

1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования характеристик теплообмена при течении жидкого металла в поперечном МП проводятся на объединенном ртутном МГД-стенде МЭИ - ИВТ РАН. Подобные исследования проводились в горизонтальной трубе в продольном МП. Результаты трехмерных измерений, выполненные по всей длине обогреваемой трубы, представлены в работах [1, 2]. Наблюдалось сильное влияние ТГК на поля температуры и распределения коэффициентов теплоотдачи (чисел Нуссельта). Непосредственные измерения поперечной компоненты скорости [2] позволили судить о структуре вторичных течений, которые имеют вид одного вихря (односторонний обогрев) или двух вихрей симметричных (однородный обогрев) или несимметричных. ТГК приводила к интенсификации теплоотдачи в горизонтальной обогреваемой трубе, вместе с тем нарушалась симметрия полей температуры, распределение температуры по периметру сечения становилось сильно неравномерным. При наличии продольного МП эффекты ТГК усиливались, средние числа Нуссельта не снижались несмотря на подавление турбулентности. В данной работе аналогичные исследования проводятся в поперечном МП.

2. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Конфигурация течения и схема обогрева представлены на рис.1. Эти условия соответствуют некоторым участкам теплообменных каналов blankets ТОКАМАКА с жидкометаллическим охлаждением. Двухсекционный нагреватель обеспечивал независимый обогрев правой и левой половин стенки трубы с однородной по длине плотностью теплово-

го потока q_1 и q_2 . Внутренний диаметр трубы $d=19$ мм, длина зоны обогрева $l/d=42$.

Диапазоны режимных параметров в экспериментах – числа Рейнольдса, Пекле, Грасгофа, Рэлея, Гартмана были следующими: $Re=5000 \div 120000$; Pe – до $1000 \div 30000$; Gr_q – до $1.5 \cdot 10^8$; Ra – до $5 \cdot 10^6$; $Na=0 \div 500$. Соотношения Na/Re , Na^2/Re , Gr/Re^2 были близки к натурным в реакторе ТОКАМАКЕ.

Измерения в потоке осуществляются продольным микротермопарным зондом типа «гребенка», состоящим из девяти медь-константановых термопар с толщиной коронки 0.25 мм. Перемещение зонда вдоль потока и поворот на заданный угол осуществляются управляющими механизмами, включенными в систему АСНИ стенда, по программе с персонального компьютера.

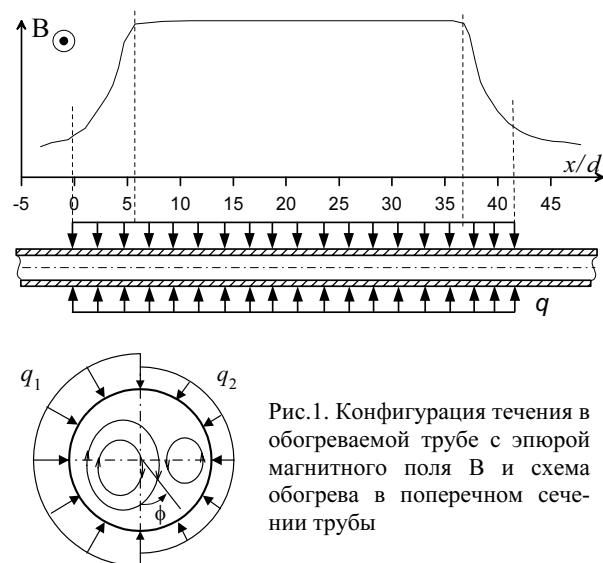


Рис.1. Конфигурация течения в обогреваемой трубе с эпюрой магнитного поля В и схема обогрева в поперечном сечении трубы

Локальные коэффициенты теплоотдачи $Nu(x/d, \phi)$ и безразмерная разность температур $\Theta=1/Nu(x/d, \phi)$ определялись по формуле

$$Nu(x/d, \phi) = (q_c d / \lambda) / (T_c(\phi) - T_{жс}),$$

где x – длина от начала обогрева; $T_c(\phi)$ – температура стенки в точке с углом ϕ в данном сечении x/d ; $T_{жс}$ – среднemasсовая температура жидкости в данном сечении x/d ; $q_c = (q_1 + q_2) \cdot 0.5$ средняя плотность теплового потока; λ – теплопроводность ртути.

Средние числа Нуссельта $Nu(x/d)$ определялись по такой же формуле, где вместо $T_c(\phi)$ подставлялось усредненное по углу ϕ значение температуры

стенки T_c . Здесь и ниже под средним числом Nu подразумевается именно такая величина.

Определение температуры T_c экстраполяцией на стенку температурного профиля в потоке, измеренного термопарным зондом, позволяет исключить погрешность, связанную с термическим контактным сопротивлением на границе стенка – жидкий металл.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим режим несимметричного обогрева со следующими параметрами: $Re=10000$ ($Pe \approx 250$), $q_1/q_2 = 35/15$ (kWt/m^2), $Gr=5.7 \cdot 10^7$.

На рис. 2 показаны распределения среднего числа Нуссельта по длине трубы в отсутствие и при наличии МП. Сплошной линией показана зависимость Лайона $Nu_T = 7 + 0,025Pe^{0,8}$ с учетом начального участка [4], которая хорошо описывает теплоотдачу при турбулентном течении в отсутствие ТГК и МП при условии $q_c = const$. Хорошо видно, что наши точки вначале неплохо укладываются на эту кривую, а потом при $x/d \approx 7$ начинают расходиться с ней. В отсутствие МП ($Ha=0$) числа Нуссельта оказываются выше зависимости Лайона, что объясняется интенсификацией теплоотдачи вторичными течениями ТГК.

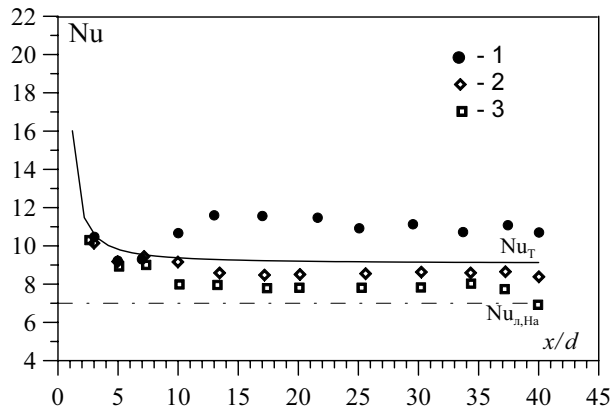


Рис.2. Распределение среднего числа Нуссельта по длине в поперечном МП, $q_1/q_2 = 35/15$, $Re = 10000$: 1 - $Ha=0$; 2 - $Ha=100$; 3 - $Ha=320$

Начиная с сечения трубы $x/d \approx 12$ точки выходят на горизонтальную асимптоту, что может свидетельствовать о стабилизации теплоотдачи. Иная картина наблюдается в поперечном МП – теплоотдача монотонно снижается по длине трубы и оказывается ниже зависимости Лайона, что объясняется подавлением турбулентного переноса.

Локальные значения теплоотдачи, как было показано ранее [1-3], могут сильно отличаться от средних. На графике рис. 3 показаны распределения величины $\Theta = 1/Nu$ по длине на верхней и нижней образующих трубы. Вихревые течения ТГК приводят к нарушению осевой симметрии в распределении температур по сечению трубы. При этом температуры на верхней и нижней образующих существенно отличаются друг от друга, поэтому этот график характеризует влияние вторичных течений ТГК.

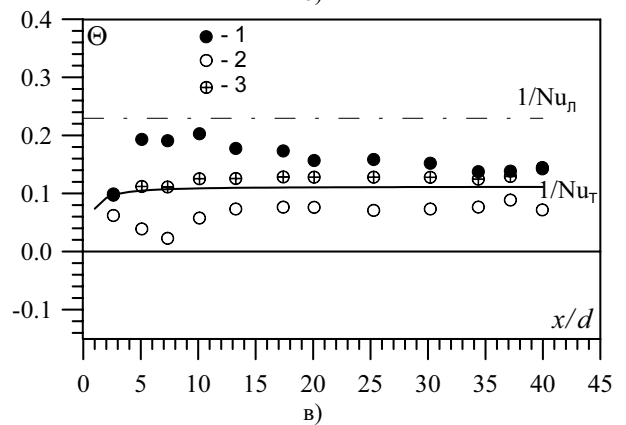
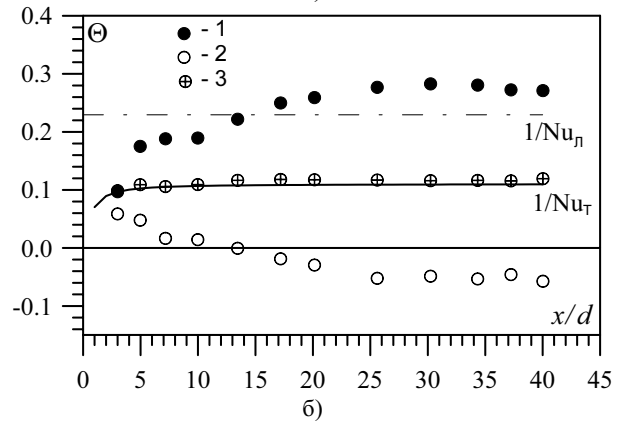
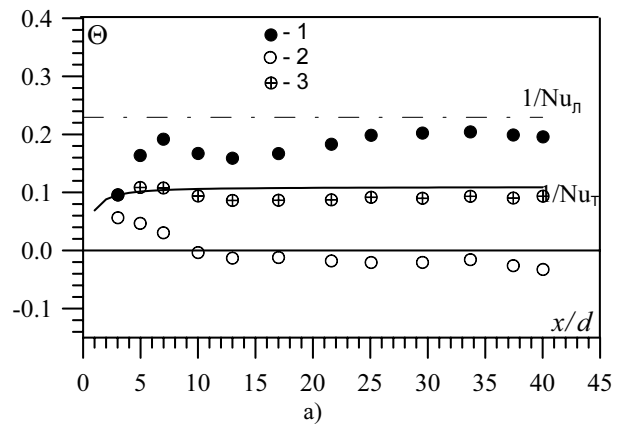


Рис.3. Распределение величины Θ по длине в поперечном МП, $q_1/q_2 = 35/15$, $Re = 10000$: а — $Ha=0$; б — $Ha=100$; в — $Ha=320$; 1 — на верхней образующей; 2 — на нижней образующей; 3 — средняя по сечению трубы

При относительно небольшом значении числа Гартмана ($Ha=100$) (рис. 3, б), эффекты ТГК усиливаются: разница между значениями величины Θ на верхней и нижней образующих возрастает. Это можно объяснить тем, что поперечное МП подавляет турбулентность, вследствие чего растут градиенты температур в потоке, возрастают силы плавучести, а значит и ТГК. Напротив, сильное МП $Ha=320$ (рис. 3, в) тормозит свободную конвекцию и снижает эффекты ТГК.

Характерные поля температуры в сечении потока, удаленном от входа в зону обогрева, показаны на рис. 4. Хорошо видно, что вторичные течения нарушают симметрию полей температуры, которая восстанавливается в поперечном МП.

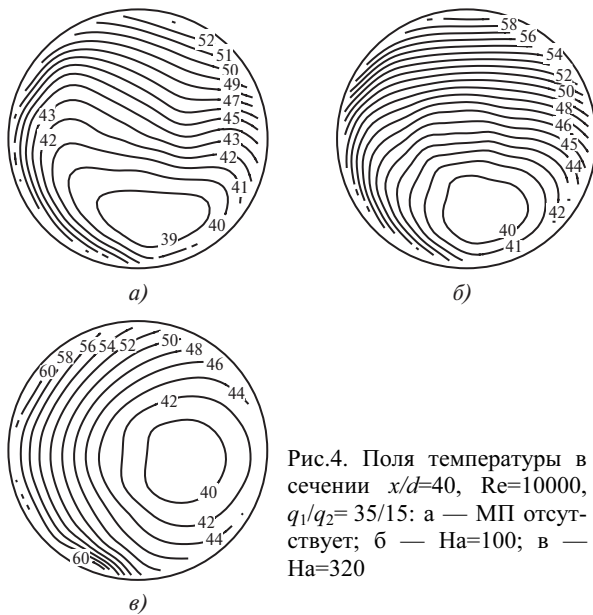


Рис.4. Поля температуры в сечении $x/d=40$, $Re=10000$, $q_1/q_2=35/15$: а — МП отсутствует; б — $Ha=100$; в — $Ha=320$

Магнитное поле, подавляя турбулентность, вытягивает поля температуры, при этом неравномерность в распределении температуры стенки по периметру поперечного сечения трубы возрастает. Это хорошо видно на рис. 5.

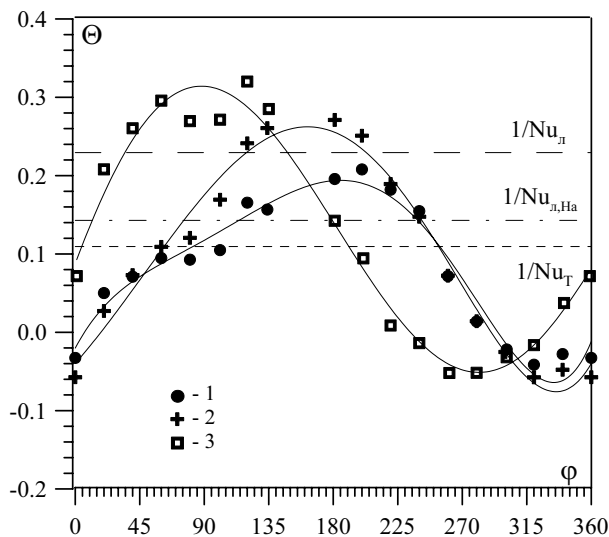


Рис.5. Распределение величины Θ по периметру сечения трубы $x/d=40$ в поперечном МП, $q_1/q_2=35/15$, $Re=10000$: 1 - $Ha=0$; 2 - 100; 3 - 320

Рассмотрим аналогичные результаты для режима несимметричного обогрева при большем числе Рейнольдса: $Re=35000$ ($Pe \approx 850$), $q_1/q_2=55/35$ (кВт/м^2), $Gr=1 \cdot 10^8$. Как видно из рис. 6, средние числа Нуссельта при $Ha=0$ мало отличаются от зависимости Лайона. Вклад ТГК в интенсификацию теплоотдачи здесь ниже, чем в предыдущем случае. С ростом числа Гартмана числа Нуссельта монотонно снижаются, приближаясь к значению $Nu \approx 7$, как и в случае однородного обогрева [3]. Длина начального термического участка возрастает и занимает всю рассматриваемую область трубы.

На рис. 7 показаны распределения величины $\Theta=1/Nu$ на верхней и нижней образующих трубы.

Влияние ТГК на локальные значения теплоотдачи также наблюдается в отсутствие МП, но уже не так сильно выражено. В сильном поперечном МП при $Ha=500$ (рис. 7, б) этот эффект исчезает и значения Θ на верхней и нижней образующих трубы практически совпадают.

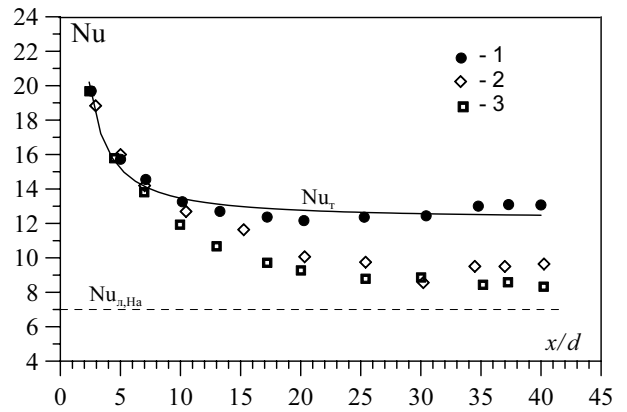


Рис.6. Распределение среднего числа Нуссельта по длине в поперечном МП, $q_1/q_2=55/35$, $Re=35000$: 1 - $Ha=0$; 2 - 100; 3 - 320

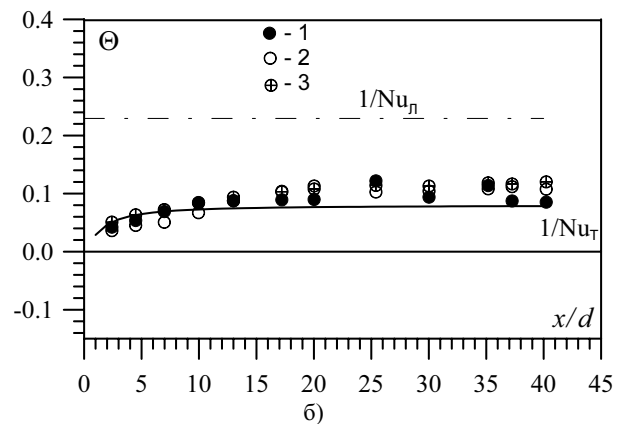
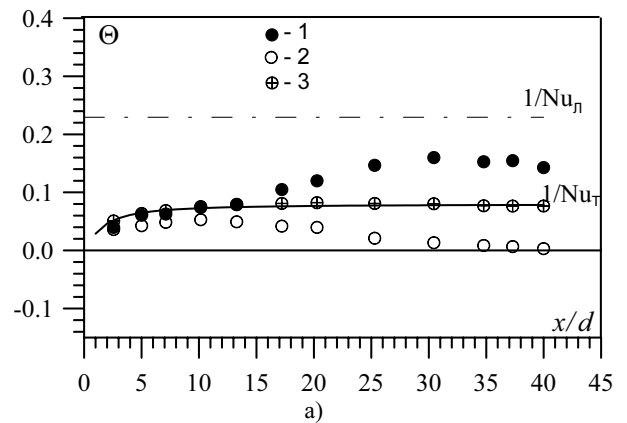


Рис.7. Распределение величины Θ по длине в поперечном МП, $q_1/q_2=55/35$, $Re=10000$: а — $Ha=0$, б — $Ha=500$; 1 — на верхней образующей, 2 — на нижней образующей, 3 — средняя по сечению трубы

Поперечное МП полностью подавляет ТГК, симметрия полей температуры восстанавливается (рис. 8).

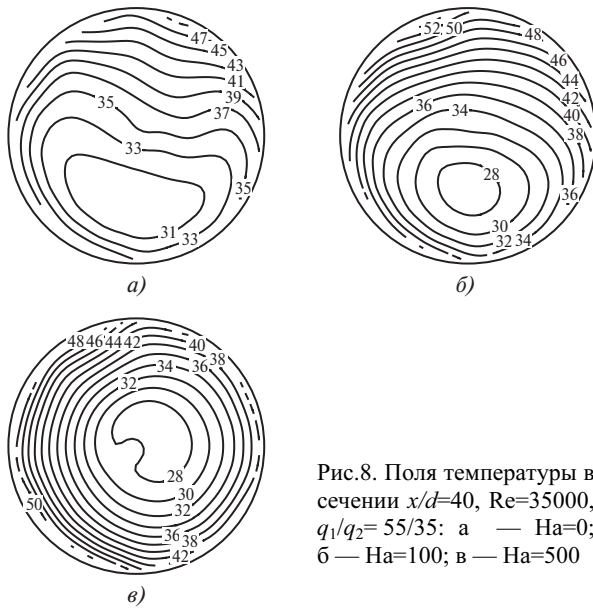


Рис.8. Поля температуры в сечении $x/d=40$, $Re=35000$, $q_1/q_2=55/35$: а — $Ha=0$; б — $Ha=100$; в — $Ha=500$

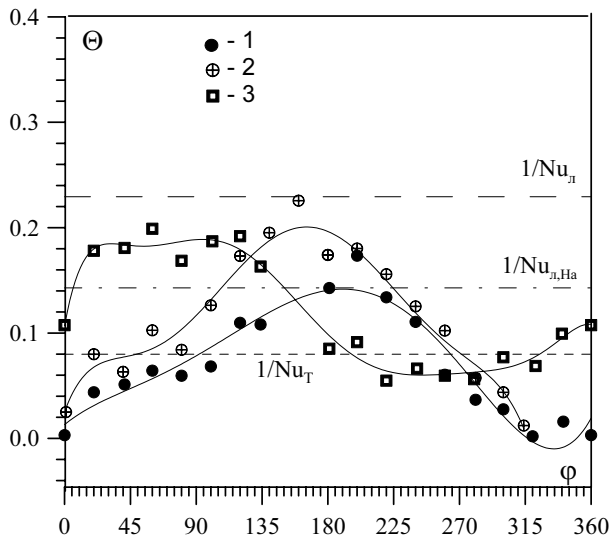


Рис.9. Распределение величины Θ по периметру сечения трубы $x/d = 40$ в поперечном МП, $q_1/q_2 = 55/35$, $Re = 35000$: 1 - $Ha=0$; 2 - 100; 3 - 500

Неоднородность в распределении температуры стенки по периметру сечения трубы с ростом числа Гартмана сначала ($Ha=100$) несколько вырастает, затем ($Ha=300-500$) несколько снижается, но остается существенной (рис.9). В случае, когда обогревается только одна сторона трубы ($q_2=0$, здесь не представлено), такая неоднородность в поперечном МП значительно вырастает. Эти факты имеют значение для инженерных расчетов, так как температурная неоднородность на стенке приводит к дополнительным термическим напряжениям и может привести к нежелательной деформации трубы.

Экспериментальные данные, полученные при больших Рейнольдса ($Re=50000-100000$) характеризуются снижением влияния ТГК, которая практически исчезает в поперечном МП.

Полученные в ходе исследований результаты без МП представляют самостоятельный интерес и могут быть полезны для разработок жидкометаллических теплообменников.

Работа выполнена при поддержке грантов Министерства образования и науки РФ и РФФИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 / Тр. II-й Российской национальной конференции по теплообмену. М., 1998. Т. 3. С. 147-15.
2. Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г., Устинов А.В. О структуре вторичных течений в потоке жидкого металла в условиях реактора-токамака // Теплоэнергетика. 1996. №12. С. 64-66.
3. Генин Л.Г., Листратов Я.И., Свиридов В.Г., Жилин В.Г., Ивочкин Ю.П., Свиридов Е.В., Разуванов Н.Г. Экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена жидких металлов в магнитных полях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез. М., 2003. Вып. 4. С. 35-44.
4. 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.