

17. **Smith D., Park J.-H., Lyublinski I., Evtikhin V., Perujo A., Glassbrenner H., Terai T., Zinkle S.** Progress in coating development for fusion systems. — Fusion Eng. Des., 2002, vol. 61—62, p. 629—641.
18. **Evtikhin V.A., Vertkov A.V., Lyublinski I.E.** Self-healing electrical insulating coating process for vanadium alloys-lithium systems. — Ibid, 2001. vol. 58—59, p. 731—735.
19. **Евтихин В.А., Люблинский И.Е., Вертков А.В., Чуманов А.Н.** Разработка многофункциональных покрытий для термоядерных установок и реакторов. — В сб.: Доклады 3-й Международной конференции «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов» (ОТТОМ-3), Харьков, Украина, сентябрь 9—13, 2002. — Харьков: ННЦ ХФТИ, ч. II, с. 107—111.
20. **Тебус В.Н., Петров Б.В., Клабуков Ю.Г., Волошин Л.А.** Выделение трития из лития струйной возвратно-поточной неравновесной молекулярной дистилляцией. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 3, с. 260—269.
21. **Votinov S.N., Vatulin A.V., Vedernikov J.P., Gubkin I.N., Sokolovsky D.V., Shikov A.K.** Novel structural material for fusion reactor on V—Ti—Cr system base canned in ferritic stainless steel. — В сб.: Тезисы докладов 4-й Международной конференции «Ядерная и радиационная физика», Алматы, Казахстан, 15—17 сентября 2003 г.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2003 г.
 Вопросы атомной науки и техники.
 Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 3—35

УДК 621.039.6.536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

*Л.Г. Генин, Я.И. Листратов, В.Г. Свиридов, В.Г. Жилин,
 Ю.П. Ивочкин, Н.Г. Разуванов*

На экспериментальном МГД-комплексе МЭИ—ИВТ РАН проводятся исследования теплообмена при течении жидкого металла в трубе применительно к каналам охлаждения первой стенки и blankets термоядерного реактора токамака. В работе представлены результаты измерений полей осредненной и пульсационной температуры, профилей скорости, распределений локальных и средних коэффициентов теплоотдачи при течении ртути в горизонтальной обогреваемой трубе в продольном и поперечном магнитном поле. Рассматриваются различные варианты обогрева. Обнаружено сильное влияние термогравитационной конвекции (ТГК). Результат совместного воздействия ТГК и магнитного поля неоднозначен и существенно зависит от направления вектора магнитной индукции, а также от схемы обогрева.

MHD HEAT TRANSFER INVESTIGATION FOR A LIQUID METAL FLOW. L.G. GENIN, Ya. I. LIS-TRATOV, V.G. SVIRIDOV, V.G. ZHILIN, Yu.P. IVOCHKIN, N.G. RAZUVANOV. The liquid metal MHD heat transfer investigations applied to fusion TOKAMAK reactor were carried out using the experimental complex MPEI-IIIH. Mean and fluctuation temperature fields, mean velocity profiles, local wall temperature and heat transfer intensity distributions with and without longitudinal or transverse MF were measured in horizontal tube. Various configurations of applied heat flux were taken into consideration. Strong influence of thermo-gravitational convection was observed in horizontal heated tube. The thermo-gravitational convection affects LM heat transfer in a tube were essentially ambiguous depending on magnetic field direction and heat flux configuration.

Развитие новых перспективных направлений в энергетике предполагает широкое использование жидких металлов (ЖМ). ЖМ обладают рядом преимуществ по сравнению с неметаллическими средами, что оправдывает их применение в качестве теплоносителя в ядерных и термоядерных энергетических установках и благодаря низкому давлению паров и высокой температуре кипения особенно привлекательны для систем охлаждения blankets и дивертора реакторов термоядерного синтеза типа токамак. В связи с этим возрастает интерес к экспериментальным исследованиям гидродинамики и теплообмена при течении жидких металлов в сильных магнитных полях (МП).

МГД-комплекс. В рамках федеральной программы «Интеграция» МЭИ—ИВТ РАН на базе двух экспериментальных стендов создан и введен в эксплуатацию экспериментальный комплекс для исследования гидродинамики и теплообмена при течении жидкого металла в трубах и каналах в сильных магнитных полях. Стенды представляют собой герметизированные ртутные контура, на которых изучаются процессы в продольном (стенд МЭИ) и в поперечном магнитном поле (стенд ИВТ РАН). Внешний вид стендов показан на рис. 1—2.

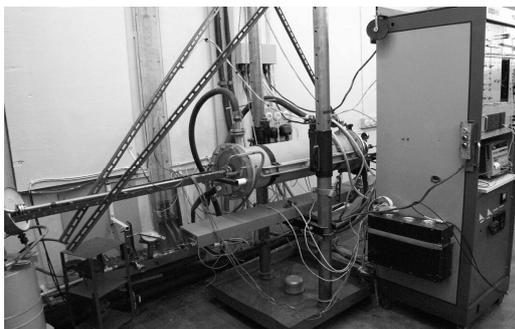


Рис. 1. Экспериментальный стенд МЭИ для исследования гидродинамики и теплообмена жидкометаллического теплоносителя в продольном магнитном поле

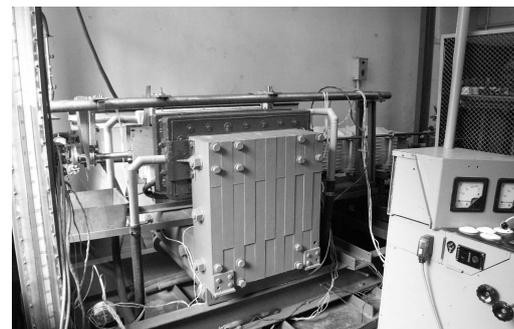


Рис. 2. Экспериментальный стенд ИВТ РАН для исследования в поперечном магнитном поле

Комплекс моделирует условия, приближенные к течению ЖМ в различных участках теплообменных каналов охлаждения реактора-токамака.

Весь процесс измерения автоматизирован благодаря существующей при каждой установке автоматизированной системе научных исследований (АСНИ). Она построена с использованием XXI-технологий и включает в себя измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), состоящий из персонального компьютера, измерительной техники отечественного и зарубежного производства на базе приборного интерфейса стандарта КОП. Персональные компьютеры оснащены средствами для проведения экспериментов в режиме удаленного доступа посредством локальной сети или сети Интернет (рис. 3).

Многие узлы и конструктивные элементы установок аналогичны или похожи. Это позволило использовать общие рабочие участки, зонды, датчики, идентичные методики измерений для обоих стендов. Комплекс МЭИ—ИВТ РАН позволяет реализовать условия течения жидкого металла в следующем диапазоне режимных параметров по числам Рейнольдса (Re — до 120 000); Пекле (Pe — до 3000); Грасгофа (Gr_q — до $3 \cdot 10^8$); Рэлея ($Ra = Gr_q \cdot Pr$ — до 10^7) и Гартмана (Ha — 0—750).

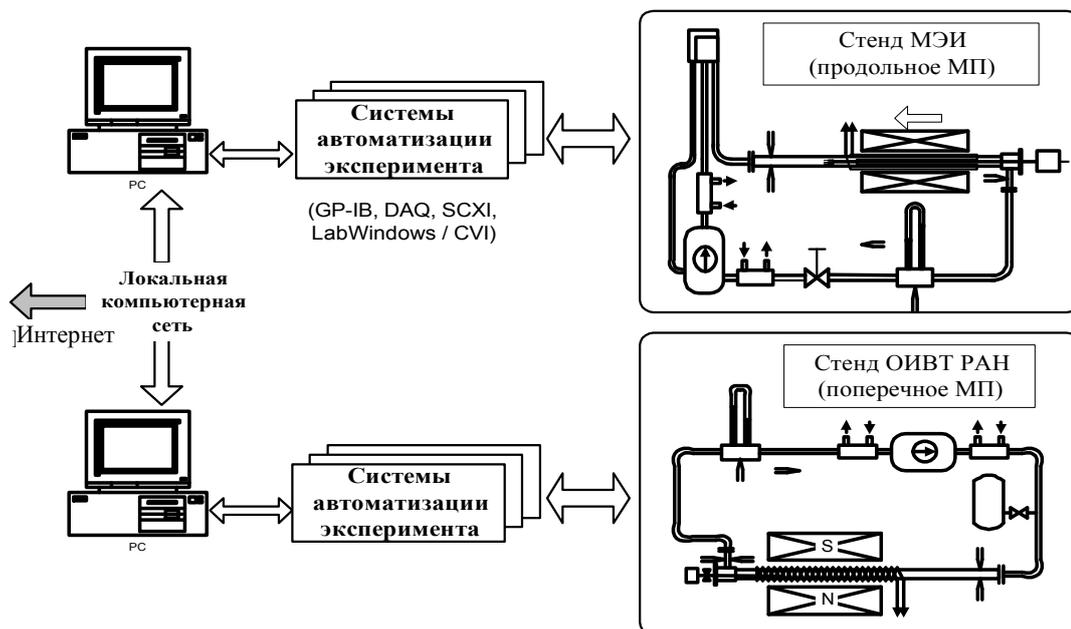


Рис. 3. Объединенный экспериментальный комплекс МЭИ—ОИВТ РАН для исследований в продольном и поперечном МП в режиме удаленного доступа

Некоторые из параметров экспериментального комплекса: рабочая жидкость — ртуть; внутренний диаметр трубы $d = 19$ мм, длина зоны обогрева $l/d = 42$.

В экспериментальных исследованиях измерения проводились зондовыми методами, применялись оригинальные зонды и датчики: микротермопарные датчики для измерения температуры в потоке, корреляционный датчик продольной компоненты скорости, электромагнитный датчик для измерения вторичных течений. Техника зондовых измерений позволила исключить погрешность, связанную с термическим контактным сопротивлением на границе «стенка—жидкость».

Результаты экспериментальных исследований. На экспериментальном МГД-комплексе проведены и в настоящее время проводятся измерения полей температуры и скорости, локальных и средних коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры при течении в обогреваемой горизонтальной трубе при наличии продольного или поперечного магнитного поля (рис. 4, *а*, *б*). Рассматриваются различные варианты обогрева трубы (рис. 4, *в*) рабочего участка: однородный обогрев $q_c = \text{const}$,

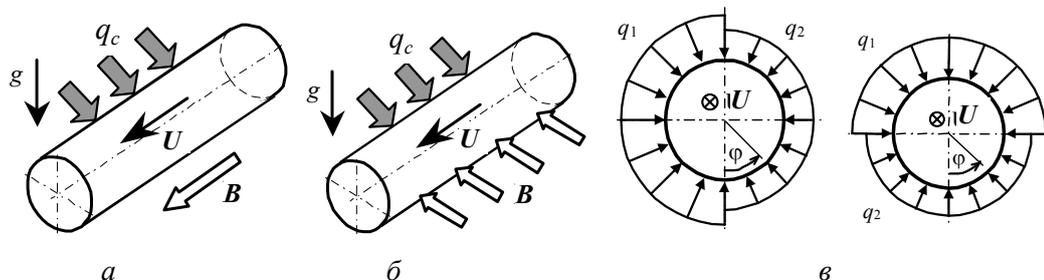


Рис. 4. Исследуемые схемы течения и обогрева: в продольном МП (*а*); в поперечном МП (*б*); схемы обогрева (*в*)

симметричный по сечению трубы; несимметричный относительно вертикальной осевой плоскости трубы (обогрев слева q_1 и справа q_2); несимметричный относительно горизонтальной осевой плоскости трубы (обогрев сверху q_1 и снизу q_2). Все конфигурации возможны в теплообменных каналах термоядерного реактора. Ниже приведены некоторые основные результаты экспериментальных данных, полученных для однородного обогрева трубы [1—2].

При отсутствии магнитного поля в горизонтальной трубе обнаружено сильное влияние термогравитационной конвекции (ТГК): поля осредненной и пульсационной температуры становятся несимметричными (рис. 5); минимум температуры потока смещается к нижней образующей трубы; распределение температуры на стенке становится неоднородным.

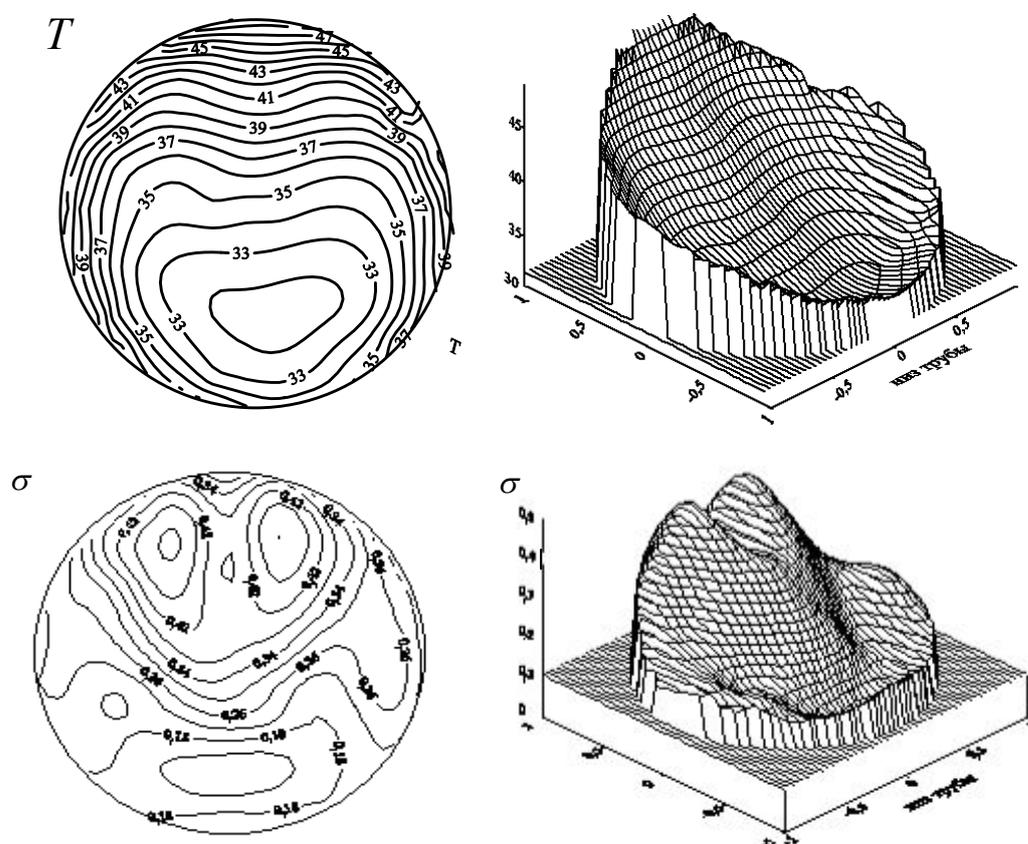


Рис. 5. Характерные поля осредненной температуры T и интенсивности температурных пульсаций σ в горизонтальной трубе с однородным обогревом: $Re = 35\ 000$; $q_c = 35\ \text{кВт/м}^2$

На рис. 6, *a* показаны зависимости средних по периметру сечения трубы безразмерных коэффициентов теплоотдачи — чисел Нуссельта Nu от числа Пекле Pe для различной плотности теплового потока на стенке q_c . Сплошная линия соответствует формуле Лайона, которая хорошо описывает теплоотдачу при стабилизированном турбулентном течении жидких металлов в отсутствие ТГК: $Nu_T = 7 + 0,025Pe^{0,8}$.

Из графика видно, что ТГК способствует интенсификации теплоотдачи: числа Нуссельта оказываются выше зависимости Лайона. На рис. 6, *б* показано распреде-

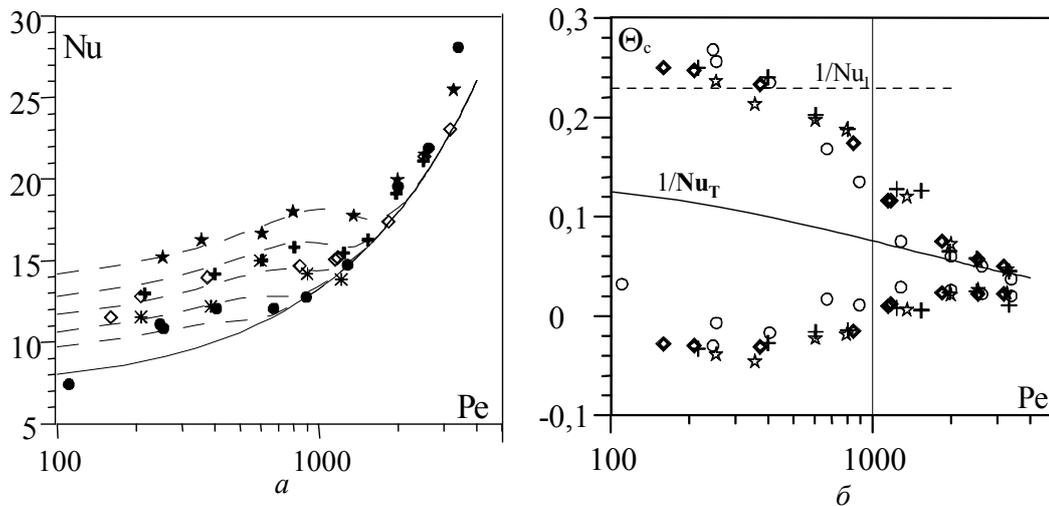


Рис. 6. Средние по сечению числа Нуссельта (*a*) и локальные значения Θ_c в верхней и нижней точке трубы (*б*) в отсутствие МП: *a* — ● — $q_c = 15$, * — 25, ◇ — 35, + — 45, ★ — 55 кВт/м², — — Nu_T ; *б* — $\Theta_c = 1/Nu$, ◇ — $q_c = 15$, ○ — 35, + — 45, ☆ — 55 кВт/м²

ление безразмерной температуры стенки $\Theta_c = \frac{l}{Nu} = \frac{T_c - T_{ж}}{q_c d / \lambda}$ на верхней и нижней

образующих при различных тепловых потоках. Как видно из графика, значения Θ_c в верхней и нижней точках трубы сильно отличаются от зависимости $1/Nu_T$: в верхней точке трубы эти значения оказываются выше, а локальные числа Нуссельта ниже значений, рассчитанных по формуле Лайона, и даже могут быть ниже, чем для чисто ламинарного режима течения $Nu_L = 4,36$.

Продольное МП усиливает влияние ТГК. Поперечное МП, напротив, в значительной степени подавляет вторичные течения ТГК. На рис. 7 поля температуры хорошо иллюстрируют этот факт.

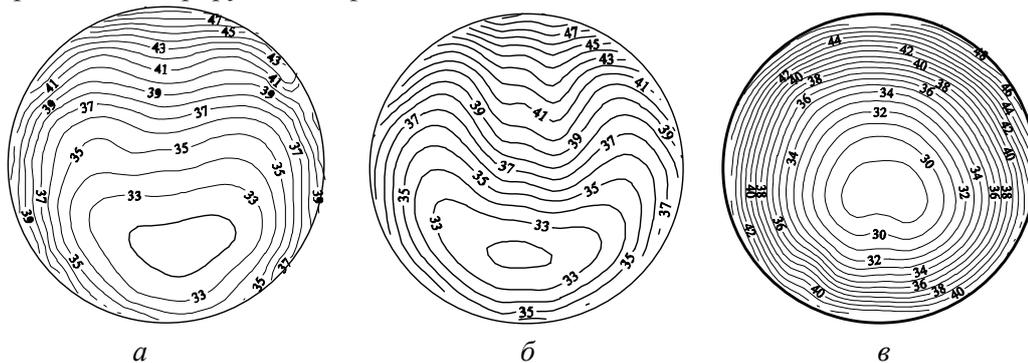


Рис. 7. Поля осредненной температуры. Однородный обогрев, $Re = 35\,000$, $q_c = 35$ кВт/м²: *a* — МП отсутствует; *б* — в продольном МП ($Ha = 450$); *в* — в поперечном МП ($Ha = 500$)

Влияние поперечного магнитного поля на теплоотдачу показывает график на рис. 8. Из графика видно, что в поперечном МП теплоотдача снижается: кривые зависимости $Nu(Re)$ расслаиваются по числу Гартмана, располагаясь между кривой Лайона и прямой 7. Магнитное поле подавляет турбулентный перенос, влияние ТГК также ослабевает. Вследствие эффекта Гартмана, который проявляется в поперечном МП, числа Нуссельта стремятся к значению, равному $Nu_{L,Ha} = 7$, а не $Nu_L = 4,36$.

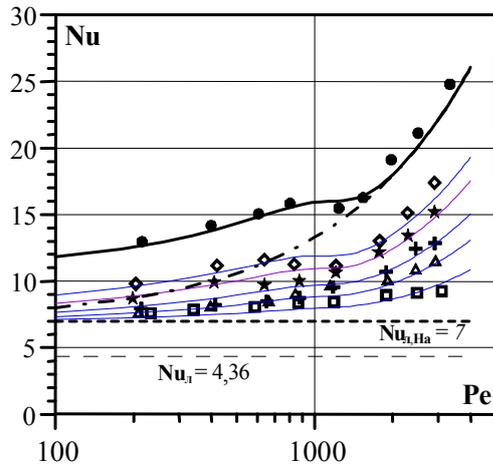


Рис. 8. Средние по сечению числа Нуссельта Nu в поперечном МП: $q_c = q_2 = 45 \text{ кВт/м}^2$; \bullet — $Ha = 0$, \diamond — 100; \star — 150; \oplus — 220; \triangle — 320; \square — 500, — $Nu_t = 7 + 0,025Pe^{0,8}$

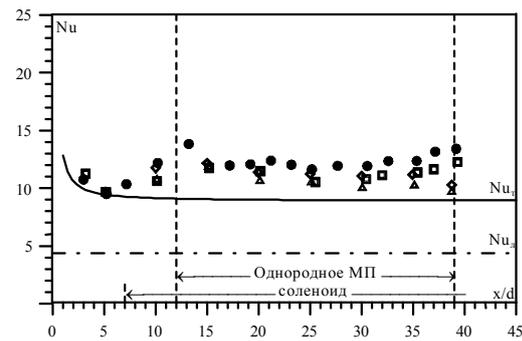


Рис. 9. Распределение среднего числа Nu по длине трубы в продольном МП: однородный обогрев $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$; $Ra = 4,7 \cdot 10^6$, $Re = 10\,000$; \bullet — $Ha = 0$; \diamond — 150; \triangle — 300; \square — 450

В продольном магнитном поле наблюдается иная картина. На рис. 9 и 10 показаны распределения среднего числа Нуссельта и величины Θ_c на верхней и нижней образующих по длине обогреваемой трубы. Хорошо видно, что в продольном магнитном поле теплоотдача почти не снижается. Даже при значении числа $Ha = 450$, когда течение ламинизировано вследствие полного подавления турбулентности, коэффициенты теплоотдачи оказываются выше не только ламинарных, но и турбулентных значений. Как видно из рис. 10, в этих условиях влияние ТГК не снижается: температура стенки на верхней и нижней образующих трубы сильно отличается.

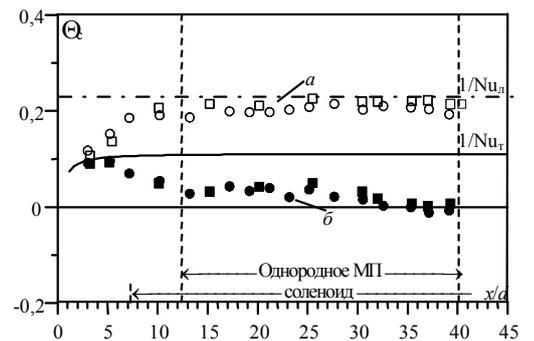


Рис. 10. Распределение безразмерной температуры стенки Θ_c по длине трубы на верхней (а) и нижней (б) образующих в продольном магнитном поле: однородный обогрев $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$, $Re = 10\,000$; 1, 2 — $Ha = 0, 3, 4—450$

Зависимости для средних и локальных чисел Нуссельта от величины магнитной индукции (числа Гартмана) при больших значениях ($Ha \sim 400—500$) выходят на горизонтальные асимптоты [3]. Это позволяет экстраполировать полученные результаты на более сильные величины МП, возможные в термоядерных установках.

Помимо температурных измерений проводились измерения различных компонент скорости. На рис. 11 показаны профили продольной компоненты W скорости в горизонтальной (а) и вертикальной плоскостях (б). Для измерений использовался корреляционный датчик скорости. Результаты обнаруживают сильное влияние ТГК, вследствие чего форма профилей (\bullet) сильно отличается от классической, соответствующей развитому турбулентному течению (\circ).

На рис. 12, 13 показаны аналогичные профили скорости при наличии продольного и поперечного магнитных полей. Результаты подтверждают выводы о совместном влиянии ТГК и магнитного поля, сделанные на основе температурных измерений.

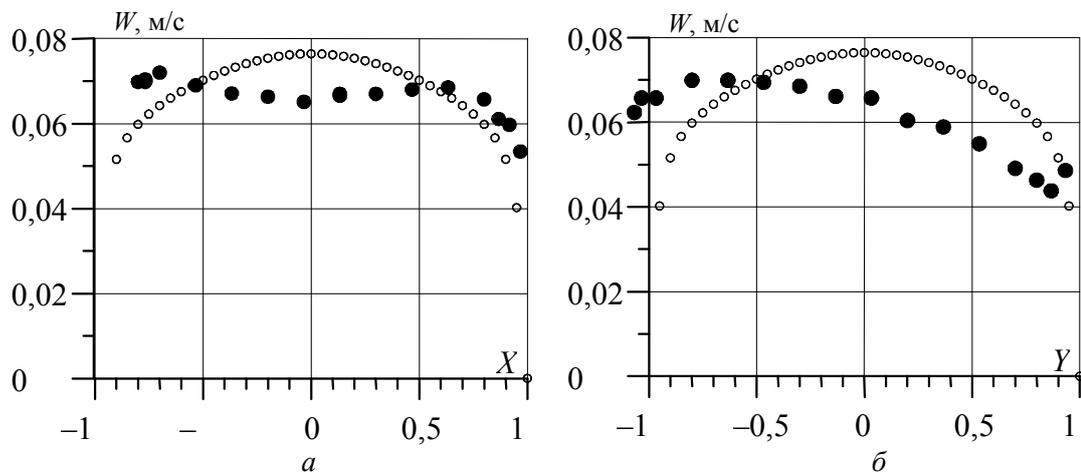


Рис. 11. Профили продольной компоненты скорости W в горизонтальной (a) и вертикальной (b) плоскостях: $Re = 10\,000$; $q_c = 25 \text{ кВт/м}^2$ (однородный обогрев); \circ — расчет по формуле Рейхардта, \bullet — опытные точки

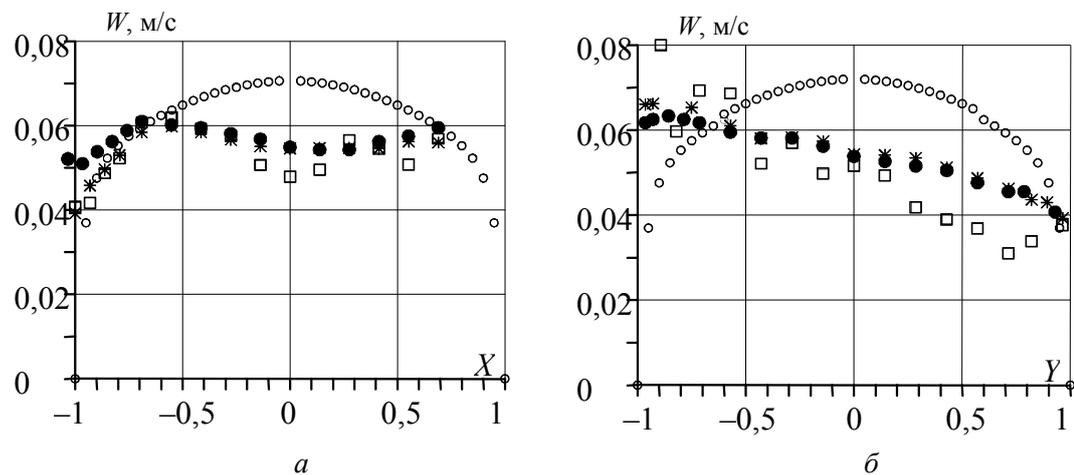


Рис. 12. Профили осредненной скорости W в продольном МП: $Re = 10\,000$; $q_c = 35 \text{ кВт/м}^2$; \bullet — $Na = 100$; $*$ — $Na = 150$; \square — $Na = 300$; \circ — расчет по формуле Рейхардта

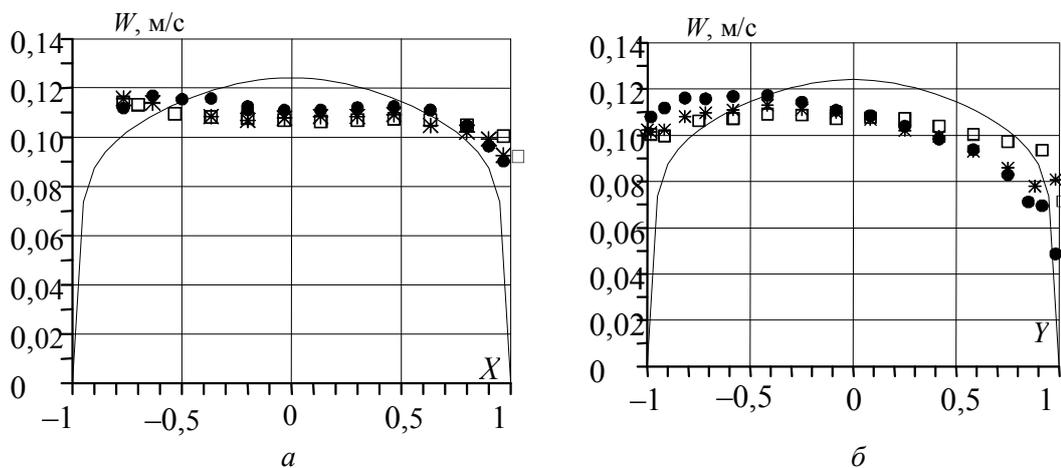


Рис. 13. Профили осредненной скорости в поперечном МП: $Re = 17\,000$; $q_c = 25 \text{ кВт/м}^2$; \bullet — $Na = 0$; $*$ — $Na = 100$; \square — $Na = 140$; — — расчет по формуле Рейхардта

Результаты, полученные для различных схем неоднородного обогрева (см. рис. 4, в), в целом ведут себя аналогично случаю однородного обогрева. Однако обнаружен целый ряд особенностей и отличий в поведении исследуемых величин.

Рассмотрим случай неравномерного обогрева, когда обогревается только одна сторона трубы, плотность теплового потока справа $q_2 = 0$. Характерные поля температуры показаны на рис. 14.

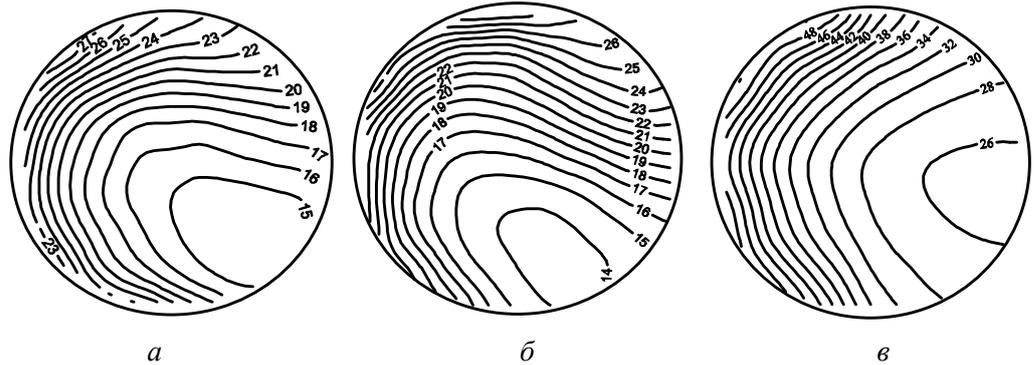


Рис. 14. Односторонний обогрев, $Re = 35\,000$; $q_1 = 35$; $q_2 = 0$ кВт/м²: а — МП отсутствует; б — в продольном МП ($Ha = 450$); в — в поперечном МП ($Ha = 320$)

Здесь также обнаруживается влияние вторичных течений ТГК. Различия в развитии ТГК в продольном и поперечном магнитных полях аналогичны случаю однородного обогрева. Непосредственные измерения скорости вторичных течений, выполненные с использованием датчика кондукционного типа в продольном МП, позволили сделать вывод о наличии в этом варианте обогрева одного вихря ТГК. Характерные профили вертикальной компоненты скорости V для разных случаев неоднородного обогрева (справа и слева) показаны на рис. 15.

Особенность развития ТГК в случае одностороннего обогрева проявляется, если рассматривать локальные коэффициенты теплоотдачи по длине трубы (подробно рассмотрено в работе [3]). На рис. 16 показано распределение величины Θ_c для верхней и нижней образующих трубы. Наблюдаемая нелинейность в поведении

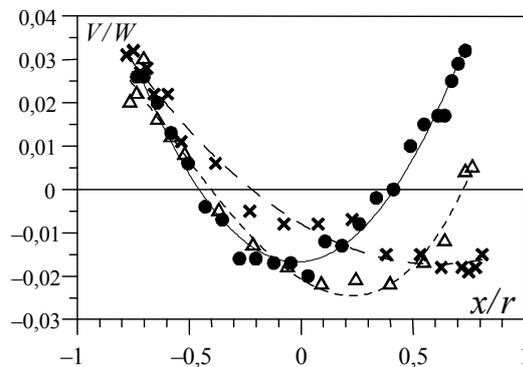


Рис. 15. Профили поперечной (вертикальной) компоненты скорости V , отнесенные к средне-массовой скорости W : $Re=3500$, $Ha=450$. Режимы обогрева: $q_1 = 35$ кВт/м²; ● — $q_1 = q_2 = 35$ кВт/м², △ — $q_1 > q_2 = 15$ кВт/м², × — $q_2 = 0$

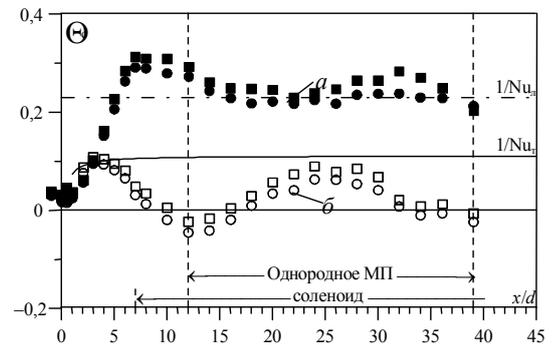


Рис. 16. Распределение безразмерной температуры стенки по длине трубы на верхней (а) и нижней (б) образующих в продольном магнитном поле: односторонний обогрев $q_1 = 35$ кВт/м²; $q_2 = 0$; $Re = 10\,000$; ●, ○ — $Ha = 0$; ■, □ — 450

экспериментальных точек связана с формированием вихревой структуры ТГК, которая происходит на всей длине участка обогрева.

Не меньший интерес представляют случаи неравного обогрева сверху и снизу горизонтальной трубы. Основные результаты были представлены в работе [4]. На рис. 17 показаны характерные поля осредненной температуры для двух случаев неустойчивой и устойчивой стратификации плотности, которым соответствуют обогрев только сверху (а) и только снизу (б).

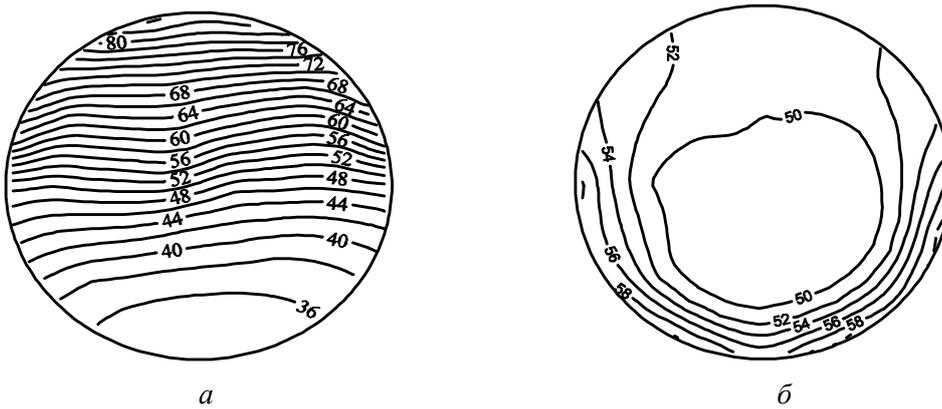


Рис. 17. Поля осредненной температуры в сечении трубы при $X = 35$, $Re = 10^4$, $Na = 400$: а — обогрев сверху, $q_1 = 45 \text{ кВт/м}^2$; $q_2 = 0$; б — обогрев снизу, $q_1 = 0$, $q_2 = 45 \text{ кВт/м}^2$

В работе [4] делается вывод, что в случае устойчивой стратификации (обогрев только сверху) вторичные течения ТГК незначительны. Наоборот, в случае неустойчивой стратификации (обогрев только снизу) в потоке имеют место сильно развитые вторичные течения ТГК. Влияние ТГК приводит к более равномерному распределению осредненной температуры в сечении потока жидкого металла в трубе. На рис. 18 показано распределение по периметру трубы безразмерной разности температуры стенки и среднемассовой температуры сечения Θ_s для трех случаев обогрева. Из рисунка видно, что в случае устойчивой стратификации неоднородность в распределении температуры стенки очень велика: в несколько раз больше, чем в двух других случаях. Локальные коэффициенты теплоотдачи в верхней части трубы оказываются намного ниже коэффициента теплоотдачи для ламинарного течения, т.е. наблюдается сильный перегрев верхней части трубы.

Как показали результаты исследований, неоднородности в распределении температуры на стенке в различных вариантах обогрева могут возрастать при наличии магнитного поля и приводить к дополнительным термическим

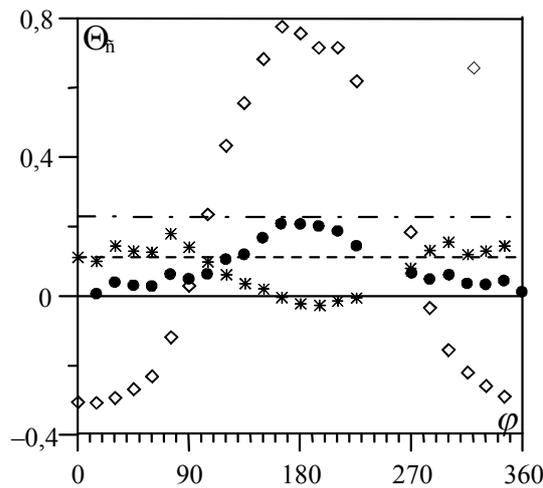


Рис. 18. Распределение Θ_s по периметру сечения трубы: $X = 35$, $Re = 10^4$, $Na = 400$: ● — однородный обогрев, $q_1 = q_2 = 25 \text{ кВт/м}^2$; ◇ — обогрев сверху, $q_1 = 45 \text{ кВт/м}^2$, $q_2 = 0$; * — обогрев снизу, $q_1 = 0$, $q_2 = 45 \text{ кВт/м}^2$; ---- — $1/Nu_T$; - · - - — $1/Nu_n$

напряжениям. Этот факт необходимо учитывать при проектировании энергетических установок.

Результаты экспериментальных исследований, полученные в отсутствие МП, имеют самостоятельное значение и могут быть полезны в других областях применения жидких металлов, например, при проектировании атомных реакторов на быстрых нейтронах и установок специального (например, космического) применения.

ВЫВОДЫ

На объединенном экспериментальном комплексе МЭИ—ИВТ РАН проведены и проводятся комплексные исследования гидродинамики и теплообмена при течении жидкометаллических теплоносителей в трубе в сильных магнитных полях.

Измерения полей температуры и скорости, локальных и средних коэффициентов теплоотдачи, статистических характеристик турбулентных пульсаций температуры при течении в горизонтальной трубе обнаруживают сильное влияние ТГК. Причем результат совместного воздействия ТГК и магнитного поля неоднозначен и существенно различается как для различных ориентаций трубы относительно вектора магнитной индукции, так и для разных вариантов обогрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ivochkin Y.P., Rasuvanov N.G., Zhilin V.G., Genin L.G., Sviridov V.G., Sviridov E.V., Ustinov A.V.** Liquid metal MHD heat transfer investigations applied to fusion TOKAMAK reactor. — Proc. of the Fourth Intern. PAMIR Conf. on MHD at Dawn of Third Millenium, France, 2000, p. 763—766.
2. **Генин Л.Г., Жилин В.Г., Свиридов В.Г., Ивочкин Ю.П., Разуванов Н.Г., Свиридов Е.В.** Гидродинамика и теплообмен при течении электропроводных жидкостей в круглой трубе в поперечном магнитном поле. — Теплоэнергетика, 2000, № 6, с. 47—50.
3. **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. Москва, 1998, т. 3, с. 147—150.
4. **Аверьянов К.В., Свиридов В.Г., Разуванов Н.Г.** Исследование теплоотдачи при течении жидкого металла в горизонтальной трубе в условиях неоднородного по периметру обогрева. — Труды Четвертой российской национальной конференции по теплообмену. — М., 2002. Т. 1, с. 175—180.

Статья поступила в редакцию 9 июня 2003 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2003, вып. 4, с. 35—44.