

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 12. С. 557–568
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 12, pp. 557–568

Научная статья
УДК 537.84
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187095>
EDN: <https://www.elibrary.ru/MGWQEY>

Экспериментальное исследование магнитоконвективных пульсаций и импульсных возмущений в жидкометаллических потоках для систем охлаждения термоядерных реакторов

Н.Е. Балабаев^{1✉}, Р.Ф. Рахимов², Я.И. Листратов³, И.А. Беляев⁴

^{1,2,3,4}Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, Российская Федерация
¹nikita.balabaev@mail.ru✉

Аннотация. В работе представлена программа экспериментальных исследований, нацеленных на изучение магнитогидродинамики жидкометаллических теплоносителей в сильных магнитных полях для применений в термоядерной энергетике. Эксперименты выполняются на стенде РК-3 (HELMEF) с использованием ртути и магнитных полей индукцией до 2,7 Тл. Исследуются две основные проблемы. Первая – возникновение низкочастотных магнитоконвективных пульсаций температуры и скорости при смешанной конвекции в вертикальных каналах, где поперечное магнитное поле, подавляя мелкомасштабную турбулентность, индуцирует крупномасштабные колебания, создающие риск усталостного разрушения материалов. Вторая – влияние импульсных возмущений (скачков магнитного поля и электрических пробоев) на стабильность течения, что моделирует реальные условия эксплуатации систем охлаждения.

Ключевые слова: магнитогидродинамика, жидкометаллический теплоноситель, магнитоконвективные пульсации (МКП), импульсные электромагнитные воздействия, термоядерный blanket, экспериментальное моделирование

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллективу Лаборатории № 5 «Возобновляемой энергетике и инженерной теплофизики» ОИВТ РАН за техническую поддержку при проведении экспериментов.

Финансирование. Работа выполняется при поддержке РФФ № 25-19-00642.

Для цитирования. Балабаев Н.Е., Рахимов Р.Ф., Листратов Я.И., Беляев И.А. Экспериментальное исследование магнитоконвективных пульсаций и импульсных возмущений в жидкометаллических потоках для систем охлаждения термоядерных реакторов // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 12. С. 557–568. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187095>

Original article

Experimental investigation of magnetoconvective oscillations and impulsive disturbances in liquid-metal flows for cooling systems of thermonuclear reactors

N.E. Balabaev¹, R.F. Rakhimov², Ya.I. Listratov³, I.A. Belyaev⁴^{1,2,3,4}Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, Russian Federation¹nikita.balabaev@mail.ru

Abstract. This paper presents a comprehensive experimental program aimed at studying fundamental magnetohydrodynamic (MHD) processes in liquid metals under strong steady and pulsed magnetic fields, with an applied focus on ensuring the reliability and safety of thermal protection systems (blankets) in fusion reactors. The relevance of the study is driven by the fact that liquid-metal blankets, despite their high technological potential for heat removal and tritium breeding, face a number of instabilities caused by the interaction of the electrically conducting coolant with the strong magnetic field used for plasma confinement.

Within this work, experiments are carried out on the RK-3 (HELMF) test facility, located at the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), using mercury as a model coolant and magnetic fields with induction up to 2,7 T.

The investigation covers two key directions. The first is the study of magnetoconvective fluctuations (MCF): low-frequency, large-scale fluctuations in temperature and velocity arising during mixed convection in vertical channels under a transverse magnetic field. It has been shown that, although the magnetic field suppresses small-scale turbulence, it promotes flow self-organization into “elevator modes,” leading to localized detachment of overheated fluid and sharp temperature spikes. Such fluctuations generate cyclic thermomechanical loads, threatening the fatigue strength of structural materials. Experimentally, an MCF regime map has been constructed in the coordinates of the Richardson and Stuart numbers; its correlation with theoretical stability boundaries obtained in numerical studies has been confirmed. It has been established that the use of passive vortex generators (rods oriented along the field) allows complete suppression of MCF, while simultaneously compensating for the heat transfer level compared to the non-magnetic case.

The second direction concerns the study of unsteady pulsed disturbances simulating accident scenarios in tokamaks, specifically, electrical breakdowns and abrupt changes in the magnetic field (e.g., during plasma thermal quench). For these tasks, a modified experimental model has been developed: a square Plexiglas cavity (40×40×250 mm), filled with mercury, placed in a constant transverse magnetic field up to 1,65 T, with the possibility of superimposing either a longitudinal pulsed magnetic field (up to 0,8 T, duration 50–100 ms) or a pulsed electric current (up to 1,5 kA). This configuration allows visualization of the liquid surface and the use of micro-thermocouples as passive tracers.

Keywords: magnetohydrodynamics, liquid-metal coolant, magnetoconvective fluctuations (MCF), pulsed electromagnetic effects, fusion blanket, experimental modeling

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of Laboratory № 5 “Renewable Energy and Engineering Thermophysics” of the Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (JIHT RAS) for technical support during the experiments.

Funding. The article was supported by RNF № 25-19-00642.

For citation. Balabaev N.E., Rakhimov R.F., Listratov Ya.I., Belyaev I.A. Experimental investigation of magnetoconvective oscillations and impulsive disturbances in liquid-metal flows for cooling systems of thermonuclear reactors. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 12, pp. 557–568. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187095>

Введение

Среди множества технологий, необходимых для освоения термоядерного синтеза ключевое место занимает вопрос о разработке надежной системы тепловой защиты (бланкета) реактора с магнитным удержанием. Условия работы такого бланкета – тепловые потоки до 5 МВт/м^2 , нейтронный поток, генерирующий объемный нагрев, магнитные поля до 8 Тл, необходимость сопряжения с другими системами реактора. Жидкометаллический бланкет на сегодня является доминирующим [1] вариантом конструкции следующего этапа термоядерных устройств, ответственных за сбор энергии реакции термоядерного синтеза и одновременное производство топлива для той же реакции путем размножения трития. Жидкометаллические бланкеты требуют большой научной проработки из-за движения жидкости, взаимодействия течения и магнитогидродинамических (МГД) эффектов, возникающих в результате движения проводящей жидкости через магнитное поле. На их работу также напрямую влияют тепловой поток плазмы и поток нейтронов. Обзор конкретных проектов жидкометаллических бланкетов приведен, например в [2]. Их анализ показывает, что на данный момент единого мнения о конструкции бланкета не сформировалось и ведутся поисковые исследования, направленные на отработку наиболее надежных принципов их функционирования. Для поддержки исследований жидкометаллических технологий в 2023 году в мире анонсированы, спроектированы и запущены в эксплуатацию новые экспериментальные установки, характеризующиеся общей тенденцией к наиболее полному воссозданию условий ТЯР. Перечислим некоторые из них. В Англии строится испытательная установка для испытаний термоядерной технологии (CHIMERA). Установка будет иметь уникальную возможность проводить полуинтегральные испытания термоядерных материалов и компонентные модули размером порядка модуля испытательного бланкета ИТЭР в условиях вакуума, высоких тепловых потоков, статических и импульсных магнитных полей и водяного охлаждения при высокой температуре и высоком давлении [3]. В США свинцово-литиевая (Pb-Li) циркуляционная петля была запущена для исследования извлечения трития из расплавленного Pb-Li. Этот эксперимент по извлечению трития (TEX) предназначен для работы при тем-

пературах и концентрациях трития, соответствующих актуальным проектам [4]. В Германии для исследования влияния магнитного поля на поток жидкого металла был разработан масштабный макет тестового модуля бланкета (ТБМ) WCLL с упором на детальные измерения величин потока в каналах сложной формы и коллекторах. Геометрия макета была заимствована из конструкции ТБМ ИТЭР. Она учитывает внутренние особенности модуля, такие как охлаждающие трубы, которые блокируют части объема жидкости и заставляют поток двигаться сложным образом [5]. Введен в эксплуатацию испытательный стенд дивертора токамака (ДТТ). Одной из основных задач ДТТ является изучение проблем отвода тепловой мощности и потока частиц в условиях, соответствующих реактору DEMO [6]. Стелларатор TJ-II дополнен модулем жидкометаллических мишеней [7]. В Голландии создана специализированная лаборатория жидкометаллической защиты (LiMeS-Lab) для разработки, испытаний и сравнения конструкций жидкометаллических диверторов термоядерных реакторов. Основными темами исследований LiMeS-lab заявлены взаимодействие жидкого металла с материалом подложки дивертора, непрерывная циркуляция и капиллярное заполнение жидким металлом при интенсивной плазменной тепловой нагрузке и удержание частиц плазмы в жидком металле [8]. В августе 2022 года компания Kyoto Fusioneering начала строительство первого в мире комплексного испытательного центра для производства термоядерной энергии. В первичном контуре установки первоначально будет использоваться Pb-Li с перспективой добавления дополнительного контура расплавленной соли размерами около $5 \times 5 \times 3 \text{ м}$ с запасом теплоносителя примерно 100 л. Строительство этого объекта планируется завершить в 2025 году. В результате работ планируется продемонстрировать извлечение тепла из макетного бланкета, высокотемпературный теплообмен, выработка электроэнергии за счет тепла бланкета и извлечение изотопа водорода в коммерчески значимых объемах [9].

В России наиболее технологически приближенной к условиям реального реактора является установка со свинцово-литиевым теплоносителем и сверхпроводящим магнитом, созданная НИИЭФА [10]. В настоящее время официальных заявлений о программе работ этого стенда нет.

В рамках экспериментального исследования, проводимого в ОИВТ РАН, предлагается впервые в мире экспериментально рассмотреть закономерности влияния импульсного воздействия электрических токов и магнитных полей, возникающих вследствие особенностей работы плазмы внутри реактора, на конвекцию жидкого металла в тепловой защите реактора. Ожидается, что кратковременные плазменные явления, такие как срывы, локализованные на краях режимы или вертикальные смещения, будут практически неизбежны в термоядерных реакторах токамак, работающих в высокопроизводительном режиме [11]. Во время таких событий состояние плазмы меняется за очень короткое время, в диапазоне от 0,0001–0,01 сек. Важным примером является разрушение – термическое гашение, за которым следует гашение тороидального тока, протекающего в плазме, которое происходит в типичном масштабе времени 10 мсек. Нас интересуют процессы, происходящие внутри blankets – реакторной конструкции, которая окружает плазменную камеру и служит тройной цели: преобразованию энергии, экранированию и размножению трития. Более конкретно, рассматриваются процессы внутри жидкометаллических модулей blankets. Предполагается, что такие модули (скорее всего, заполненные сплавом Pb-Li) значительно улучшают характеристики blankets [12]. Основное внимание в нашем исследовании уделяется немедленной реакции blankets на плазменные переходы.

В нескольких проектах термоядерных установок и гибридных установок (источников термоядерных нейтронов) рассматривается использование жидкого лития или свинцово-литиевой эвтектики в качестве теплоносителя и источника получения трития. Жидкие металлы и расплавы солей обладают высокой электропроводностью. В случае термоядерных устройств с магнитным и магнитноинерциальным удержанием плазмы работа этих сред будет происходить в присутствии сильных магнитных полей, что требует изучения термогидравлических систем в конфигурациях, приближенных по геометрии к реальным устройствам, ОИВТ РАН проводит исследования, изучая характеристики основных геометрических форм – принудительное течение в каналах и трубах, поведение струи, обтекание препятствий, потоки в комбинированных систе-

мах каналов и свободную конвекцию при совместном воздействии как сильных магнитных полей, так и высоких тепловых потоков.

1. Исследование МГД-теплообмена жидких металлов

Сложная структура течения жидких металлов в магнитном поле обуславливает возникновение нетривиальных гидродинамических режимов, чувствительных к совместному воздействию МГД-сил и обогрева.

Особый интерес представляют эффекты, вызванные влиянием внешнего магнитного поля. В частности, при совместном действии магнитного поля и сильной тепловой нагрузки могут самопроизвольно возникать колебания расхода и температуры теплоносителя [13].

Такие колебания в теплообменном тракте реактора крайне нежелательны, поскольку способны формировать локальные зоны перегрева, вызывать циклические температурные нагрузки, ускорять коррозионные процессы и, как следствие, снижать надежность и ресурс оборудования.

В качестве критерия обнаружения подобного рода неустойчивости предлагается использовать стандартное отклонение временных реализаций температуры, как меру интенсивности результирующих колебаний.

Экспериментальное исследование данных явлений в условиях сильных магнитных полей проводится на базе экспериментальной установки РК-3 (рис. 1), расположенной на территории ОИВТ РАН.

Основным элементом установки является дипольный электромагнит, способный генерировать стационарные магнитные поля с индукцией до 2,7 Тл [14].

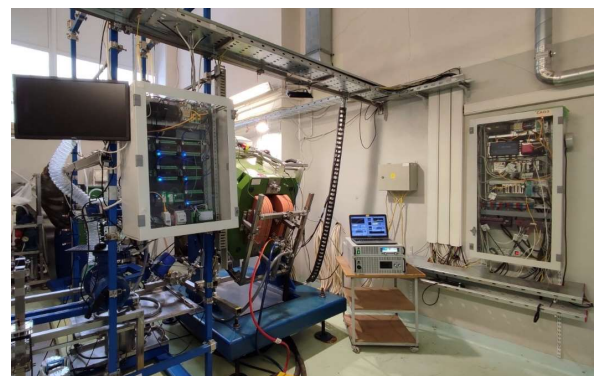


Рис. 1. Экспериментальный стенд РК-3

На рисунке 2 приведено распределение индукции магнитного поля вдоль зазора электромагнита. Возможность плавной регулировки величины поля в процессе эксперимента значительно повышает гибкость и информативность исследований.

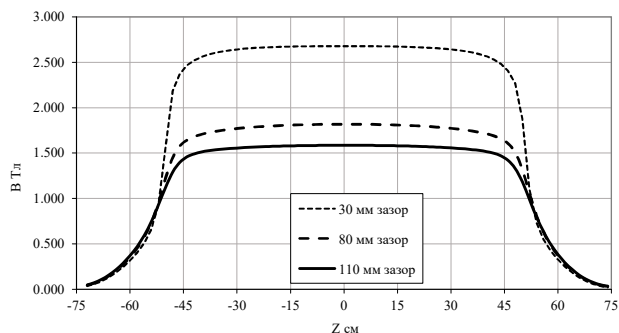


Рис. 2. Распределение магнитной индукции в зазоре электромагнита ДЭМ-1 при токе 2000 А

В экспериментальной установке в качестве теплоносителя используется ртуть. Ее наличие обусловлено возможностью создания высокого значения числа Грасгофа, которое на порядок – два превышает соответствующие значения для других жидких металлов при сопоставимых условиях. Благодаря своим свойствам ртуть позволяет проводить эксперименты по теплопередаче при минимальных тепловых потоках и объемах жидкого металла.

Выбор ртути в качестве модельного теплоносителя обусловлен, во-первых, налаженной инфраструктурой для работы с ней на базе электромагнита ДЭМ-1, а во-вторых, возможностью проведения экспериментов при комнатной температуре. По сравнению с жидкометаллическими теплоносителями, предполагаемыми к использованию в термоядерных реакторах (такими как литий или эвтектический сплав лития со свинцом), ртуть является оптимальной модельной жидкостью.

В процессе эксперимента исследование пространственно-временной структуры течения осуществляется при помощи сканирующих погружных зондов, обеспечивающих локальные измерения температуры и продольной компоненты скорости. На основе многоточечных сканированных реконструируются поля осредненной и пульсационной составляющих температуры, а также поля средней продольной скорости. Все эксперименты проводятся в полностью автоматизи-

рованном режиме, что минимизирует влияние человеческого фактора и обеспечивает высокую воспроизводимость, а также позволяет накапливать обширные массивы синхронизированных данных для последующего статистического и спектрального анализа.

Следует отметить, что из-за слабого смачивания ртутью нержавеющей стали и малой толщины стенок экспериментального канала (порядка 1 мм) электрическим сопротивлением стенок в первом приближении можно пренебречь. Тем не менее, для имитации систем с реалистичной проводимостью стенок был разработан метод нанесения тонких медных покрытий, обеспечивающих контролируемое изменение электромагнитных граничных условий.

Все эксперименты с ртутью проводятся в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности: используются герметичный контур, предусмотрена многоступенчатая система вентиляции и контроля паров ртути, а к работе допускается только персонал, прошедший специальное обучение и инструктаж. Отходы, содержащие ртуть, утилизируются в соответствии с действующим законодательством лицензированными специализированными организациями.

Достижимые параметры эксперимента на стенде РК-3 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Доступные параметры экспериментального стенда РК-3

Параметр	Величина
Плотность теплового потока	0–100 кВт/м ²
Магнитное поле	2,7 Тл (30 мм зазор), 1,8 Тл (80 мм зазор), 1,65 Тл (110 мм зазор)
Размер участка	Трубы – внутренний диаметр 19 мм; 40 мм Каналы – 16×56; 56×56; 40×40 мм×мм
Теплоноситель	Ртуть [15]
Температуры	20–180, °С

Представленные экспериментальные данные были получены в ходе экспериментов, проведенных на установке с использованием унифицированных подходов, методов и оборудования. Краткий обзор не может охватить все существующие знания о рассматриваемых процессах.

Одной из ключевых и наиболее продолжительно изучаемых задач в области МГД-теплообмена является смешанная конвекция жидкого металла в трубах и каналах. Известно, что харак-

тер течения существенно зависит от направления потока, градиента температуры и вектора силы тяжести. Принципиальное значение имеет ориентация потока относительно гравитационного поля: течение, направленное против силы тяжести, демонстрирует качественно иные особенности по сравнению с сонаправленным потоком [13]. Отдельную группу исследований составляют течения в горизонтальных каналах, обладающие специфическими гидродинамическими и теплофизическими характеристиками [16].

Общим фактором, определяющим поведение рассматриваемых течений, является влияние внешнего магнитного поля. Известно, что магнитное поле подавляет классическую изотермическую турбулентность и только наиболее интенсивные возмущения способны его преодолеть. В результате в потоке могут формироваться структурированные вихревые образования, оси которых выстраиваются вдоль вектора магнитной индукции, тогда как само течение стремится к двумерной структуре в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля.

Для количественного описания таких процессов используются характерные безразмерные комплексы. Помимо традиционных критериев таких как число Гартмана (Ha) (1), число Рейнольдса (Re) (2) и число Грасгофа (Gr) (3) особое значение приобретают комбинированные параметры такие как число Ричардсона (4), обратное число Гартмана Rh^{-1} (5) и число Стюарта N (6) [13, 17]. Формулы для указанных безразмерных критериев имеют вид:

$$Ha = BL \sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}, \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, Тл;
 L – характерный линейный размер;
 σ – электрическая проводимость жидкости;
 μ – динамическая вязкость;

$$Re = U_o \times \frac{d}{\nu}, \quad (2)$$

где U_o – средняя скорость потока;
 d – эквивалентный диаметр канала;
 ν – кинематическая вязкость, м²/с;

$$Gr = \frac{g\beta d^4 q}{\lambda\nu}, \quad (3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;
 β – коэффициент объемного расширения, 1/°С;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 λ – теплопроводность ртути, Вт/(м×К);

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}, \quad (4)$$

$$Rh^{-1} = \frac{Ha}{Re}, \quad (5)$$

$$N = \frac{Ha}{Re^2}. \quad (6)$$

Общей особенностью таких течений является формирование крупномасштабных флуктуирующих возмущений с амплитудами, существенно превышающими амплитуды, наблюдаемые в аналогичных немагнитных потоках. В работе [17] было предложено называть такие формы течения магнитоконвективными пульсациями (МКП).

Схематичный пример возникновения МКП при одностороннем нагреве в условиях нисходящего течения представлен на рисунке 4 а. Перегретая область у нагреваемой стенки отделяется от основного потока, вызывая резкий локальный скачок температуры. Механизм, лежащий в основе этого отрыва, получил название «элеваторных мод» и был детально описан в [18]. Подобные пульсирующие течения представляют потенциальную угрозу для структурной целостности каналов вследствие возникновения низкочастотных термомеханических нагрузок.

На рисунке 3 приведены центрированные осциллограммы температурных пульсаций, измеренных в центре рабочего участка на экспериментальном стенде РК-3 при однородном обогреве и тепловом потоке 35 кВт/м². Сравнение выполнено в сопоставимых режимных параметрах, но при различных диаметрах канала и величинах магнитного поля.

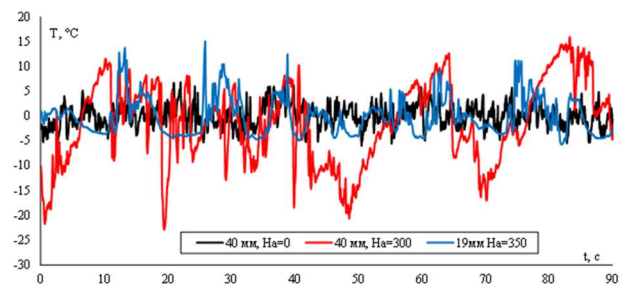


Рис. 3. Осциллограммы температурных пульсаций в центре канала на экспериментальном стенде РК-3 $Re = 10^4$: труба 19 мм и 40 мм

На основе двумерного численного моделирования в работе [18] была предложена универсальная граница перехода от стационарных (устойчивых) режимов течения к режиму магнитоконвективных пульсаций.

В экспериментах, проведенных с нисходящим потоком ртути в трубе с внутренним диаметром 40 мм и толщиной стенки 2,5 мм при однородном обогреве, была установлена область существования МКП (рис. 4 б). Были обнаружены аномально высокие отклонения температур, свидетельствующие о развитии интенсивных неустойчивостей.

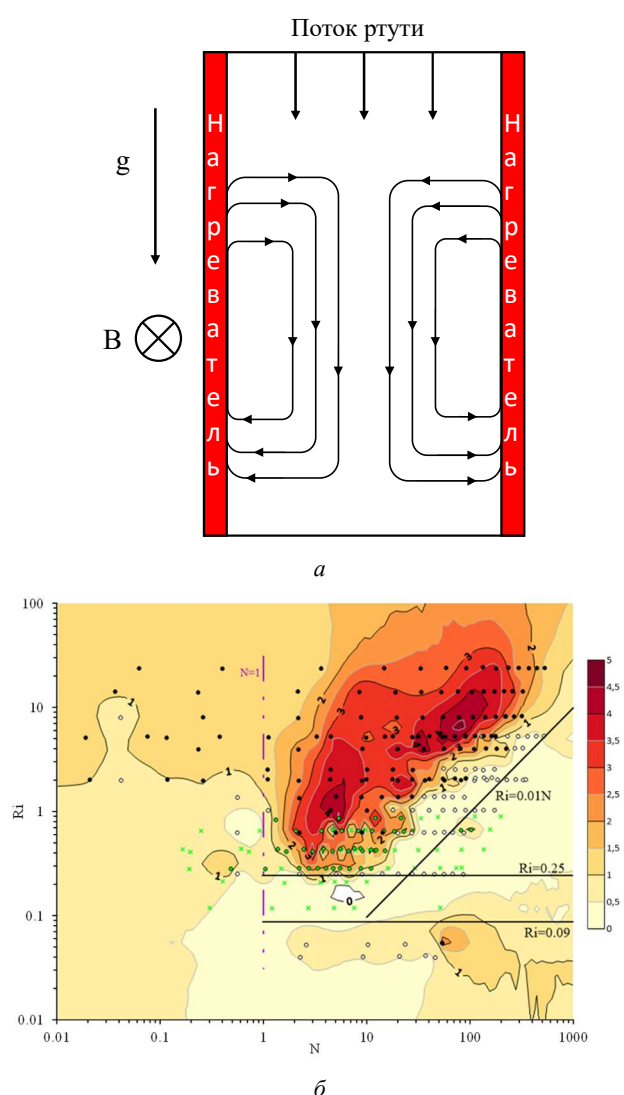


Рис. 4. Принципиальная конфигурация формирования магнитоконвективных пульсаций (МКП) под действием магнитного поля (а) и экспериментальные результаты наличия интенсивности температурных пульсаций в зависимости от чисел Ричардсона и Стюарта (зеленым – 19 мм труба, черным – 40 мм труба)

Важно отметить, что, хотя число Гартмана Na служит основным параметром, определяющим масштаб МГД-влияний, его недостаточно для описания области существования МКП. Так как Число Рейнольдса Re количественно характеризует вклад инерционных сил, то его соотношение с гравитационными и электромагнитными эффектами позволяет выделить зоны влияния МКП. Авторы считают, что именно такая комбинированная параметризация обеспечивает универсальность построенной диаграммы режимов (рис. 4 б) и ее применимость вне зависимости от конкретных масштабов скорости, размера канала или интенсивности нагрева.

Не менее важной является информация о коэффициентах теплоотдачи. В экспериментах, проведенных в присутствии магнитного поля, наблюдалось снижение безразмерного коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) до 60 % от его значения в отсутствие магнитного поля.

Вместе с тем в отдельных режимах, сопровождающихся развитием магнитоконвективных пульсаций (МКП), коэффициенты теплоотдачи восстанавливались, а в ряде случаев даже превышали значения, характерные для немагнитных условий. Однако, сопоставление коэффициентов теплоотдачи с интенсивностью наблюдаемых температурных колебаний показывает, что само по себе наличие МКП недостаточно для полного восстановления теплоотдачи.

В качестве возможного решения проблемы МКП и одновременно средства повышения эффективности систем с жидкими металлами было исследовано применение стационарных пассивных устройств для возмущения потока в условиях вынужденного течения.

Возмущение потока создается стержнем, ориентированным вдоль направления магнитного поля. За препятствием происходит отрыв потока с формированием в канале структуры, аналогичной уличной вихревой дорожке Кармана. В экспериментах удалось надежно сгенерировать и зарегистрировать влияние вихревых возбудителей на значительном расстоянии вниз по потоку от места их установки [19].

Создаваемые вихри замещают мелкомасштабную турбулентность, подавляемую магнитным полем, и, в определенном диапазоне значений числа Стюарта, не только компенсируют снижение теплоотдачи, обусловленное

магнитным полем, но и обеспечивают ее дополнительное усиление.

В пределах исследованного диапазона режимных параметров применение вихревого возбудителя полностью подавляло возникновение МКП, даже в наиболее «энергетически насыщенных» условиях – например, при асимметричном нагреве [20].

При малых расходах (низких скоростях течения) применение вихревых возбудителей, вероятно, потребует их более частой установки вдоль канала. Такое возмущение неизбежно приводит к росту гидравлического сопротивления, величина которого, по предварительным оценкам, может быть сопоставима с достигаемым приростом интенсивности теплообмена.

2. Импульсное магнитное поле и электрические разряды через жидкость в магнитном поле

Для корректной оценки работоспособности систем тепловой защиты необходимо также обобщать работоспособность в переходных и неустойчивых режимах работы систем магнитного удержания плазм. Нестационарные магнитогидродинамические (МГД) процессы в сплошных проводящих средах, возникающие из-за сбоев в работе плазмы в токамаках, представляют собой критическую проблему безопасности для будущих термоядерных реакторов, особенно во время переходных процессов с характерными временными интервалами от 0,1 до 100 мс. Отсутствие четкой феноменологической модели и надежных методов диагностики ключевых параметров, таких как скорость потока, динамика давления и плотность индуцированного тока, препятствует прогрессу в этой области. Для корректного описания потоков разрабатываются методы численного моделирования на основе работы [22]. Как и в описанных ранее случаях, ожидается образование крупномасштабных возмущений в объеме жидкого металла, правильное понимание которых должно основываться на экспериментальных данных.

Импульсное воздействие электромагнитных полей на свободный объем жидкого металла можно охарактеризовать как нестационарный кратковременный процесс. Экспериментальная фиксация такого события требует сверхчувстви-

тельных датчиков измерения: скорости, давления, электропотенциала, которые обладают низкой инерционностью. Кроме того, большинство известных датчиков, работа которых основывается на измерении потенциала, могут оказаться непригодными из-за вторичных возмущений и помех различного рода, которые существуют в подобных задачах. На этапе выбора и отладки методики измерения планируется рассмотреть несколько перспективных подходов, способных визуализировать процессы, происходящие в объеме жидкого металла. К сожалению, классическое применение одного из самых популярных методов визуализации потока – Particle Image Velocimetry (PIV, отслеживание перемещения трассировочных частиц с помощью подсвечивающего лазера и фиксирующей камеры) невозможно из-за непрозрачности исследуемой среды. Однако организация свободного объема жидкого металла с открытой свободной поверхностью позволяет применить методику PIV, отслеживая перемещение трассировочных частиц, обладающих существенно меньшей плотностью, находящихся на поверхности жидкого металла. Известно, что в неизотермических течениях пульсации скорости связаны с пульсациями температуры, следовательно через измерение одной характеристики можно делать предположения о поведении другой. Создание небольшого градиента температуры с устойчивой стратификацией плотности в объеме жидкого металла, не приводящего к возникновению вторичных течений, дает возможность использовать микротермомпары. Таким образом, температура становится пассивной примесью и по аналогии с трассировочными частицами является маркером перемещения потока в жидком металле. Кроме температуры, маркером может быть разность потенциалов, которая задается между двумя стенками полости. Независимо от выбора основной методики измерения, размещение датчиков в исследуемой области не менее важный вопрос. В отличие от задач вынужденной конвекции, требования к размерам и чувствительности датчиков в задачах свободного объема строже. Возмущения, которые могут возникать за счет столь инвазивных методов, могут быть сравнимы с возмущениями, создающимися непосредственно воздействием импульсных токов или магнитных полей.

В качестве упрощенных систем лабораторных исследований предлагается рассмотреть горизонтальную полость квадратного сечения, заполненную жидким металлом (ртутью), находящуюся в сильном статическом поперечном магнитном поле, для изучения воздействия продольного импульса электрического тока (рис. 5 а) или продольного импульса магнитного поля (рис. 5 б).

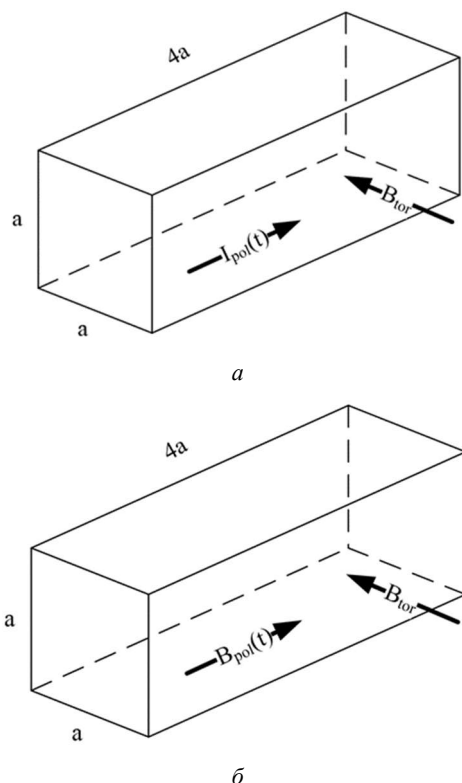


Рис. 5. Принципиальные конфигурации импульсного электрического пробоя через жидкий металл (а) и импульсного магнитного поля (б) при постоянном поперечном МП

Конструкция импульсной катушки (рис. 6–7) представляет собой соленоид, состоящий из двух витков, с внутренним диаметром 80 мм. Исследуемый участок размещен в прямоугольной полости с внутренними размерами 40×40×250 мм, изготовленной из органического стекла. Выбор прозрачного материала обусловлен возможностью применения не только классических методов диагностики течений в сплошной электропроводящей среде, но и проведения высокоскоростной съемки для визуализации возникновения возмущений в импульсном магнитном поле и развития электрического пробоя.

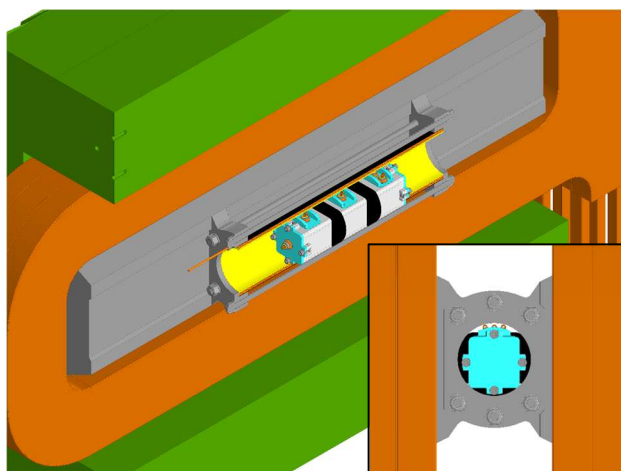


Рис. 6. Схема расположения опытного участка в электромагните ДЭМ-1 и импульсной катушкой продольного магнитного поля

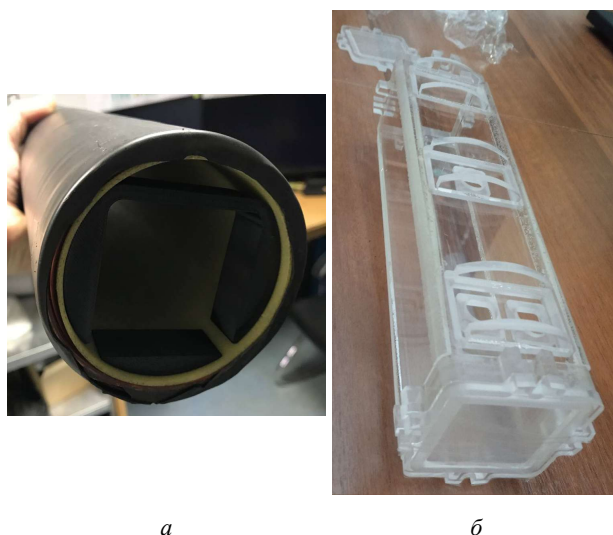


Рис. 7. Фотография а – импульсной катушки продольного магнитного поля и б – опытного участка из органического стекла

Исследование нестационарных импульсных процессов, максимально приближенных к реальным переходным процессам в термоядерной установке ТОКАМАК, планируется проводить в постоянном поперечном магнитном поле, создаваемом электромагнитом ДЭМ-1. Магнитная индукция этого поля может достигать 1,65 Тл. Геометрия и расположение полости с жидким металлом обеспечивают высокую однородность продольного распределения магнитного поля (рис. 8). При этом неоднородность поперечной составляющей магнитного поля не превышает 0,3 % от максимального значения магнитной индукции в рабочем режиме электромагнита.

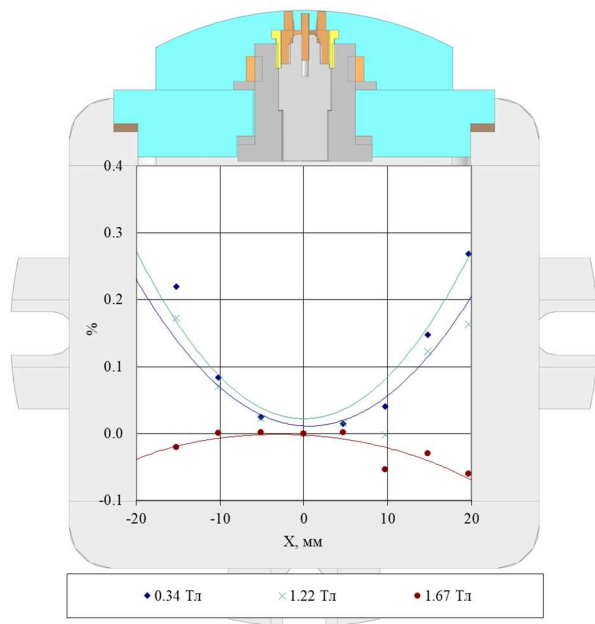


Рис. 8. Процент поперечной неоднородности поперечного магнитного поля по ширине квадратного канала и распределение магнитной индукции с расположенной импульсной магнитной катушкой продольного магнитного поля с опытным участком

Первые испытательные импульсы на соленоиде были проведены при мощности, ограниченной в 10 раз по сравнению с номинальной. Даже в этих условиях можно анализировать характер распределения тока, напряжения и, соответственно, магнитной индукции. На рисунке 9 представлен импульс магнитного поля и электрического тока длительностью 100 мс, используемый для моделирования электрического пробоя. Следует отметить, что заданный импульсный источник позволяет сократить длительность импульса до 50 мс, что приводит к резкому спаду магнитной индукции (рис. 10).

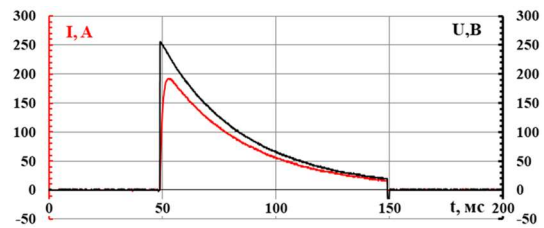


Рис. 9. Экспериментально полученное напряжение и электрический ток в соленоиде во время тестового импульса

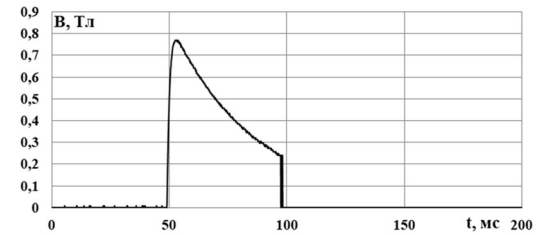


Рис. 10. Оценка тороидального магнитного поля

Планируемая установка имеет определенные ограничения по достижению значений безразмерных критериев подобия (например, числа Гартмана). Для сравнения: при идентичной конструкции установки (таблица 2) использование лития в качестве потенциального теплоносителя для термоядерных установок позволяет увеличить безразмерные характеристики более чем в два раза. В то же время, применение альтернативных жидких металлов, таких как свинец или сплав свинца с литием, снижает эти характеристики, делая их практически равными показателям модельной жидкости – ртути.

С точки зрения перспектив развития экспериментальных работ наиболее предпочтительным вариантом является исследование жидкого натрия, чьи расчетные показатели по числу Гартмана сопоставимы с реальными условиями в случае применения Pb-Li в условиях реальных энергетических установок (таблица 2).

Таблица 2. Характерные величины чисел Гартмана для канала 40×40 с разными жидкометаллическими теплоносителями

Теплоноситель	Температура, °С	Характерные числа Гартмана (Ha)			
		Магнитное поле			
		На базе электромагнита ДЭМ-1		Ожидаемое в сверхпроводимых магнитах энергетических установок	
		Поперечное (1,65 Тл)	Продольное (0,8 Тл)	Поперечное (10 Тл)	Продольное (5 Тл)
Ртуть (Hg)	60	1 780	860	10 788	5 375
Литий (Li)	220	3 890	1 880	23 576	11 750
Сплав свинца и лития (PbLi)	300	1 300	630	7 879	3 938
Свинец (Pb)	350	1 430	690	8 667	4 313
Сплав галия (GaInSn)	60	2 820	1 360	17 091	8 500
Натрий (Na)	200	8 750	4 240	53 030	26 500

Для осуществления выбора диагностических датчиков были проведены оценки ожидаемых давлений жидкости и скоростей потока на основе моделирования либо импульса тока 1,5 кА, либо импульса магнитного поля 0,8 Тл в однородном поперечном магнитном поле 1,7 Тл [24].

Была подтверждена работоспособность пьезоэлектрических датчиков давления в сильных магнитных полях, и для повышения надежности в условиях сильных электромагнитных помех была предложена комбинированная измерительная система, использующая волоконно-оптические датчики.

Заключение

В рамках проведенной работы был успешно реализован экспериментальный подход, позволивший получить репрезентативные данные о поведении жидкометаллических теплоносителей в сильных магнитных полях в контролируемых лабораторных условиях.

Сформулированы и решены ключевые задачи, связанные с применением жидких металлов в термоядерных системах. Выявлены и систематизированы основные проблемы, такие как аномальный рост гидравлического сопротивления, специфические МГД-эффекты, определяющие теплообмен, а также сложное мультифизическое взаимодействие с плазмой и разрядами в камере. Важно отметить, что эти критические условия ранее не изучались детально в контролируемой среде из-за сложности их воспроизведения в натурном эксперименте.

Значимым результатом стало построение карты режимов течения, которая идентифицирует и описывает область существования и параметры магнитоконвективных пульсаций (МКП), что необходимо для прогнозирования опасных режимов термоциклирования элементов конструкции.

Для дальнейшего углубленного обоснования безопасности таких систем запланирована модернизация экспериментального стенда. Это позволит исследовать два принципиальных аварийных сценария, учитывающих воздействие импульсных токов до 1,5 кА и кратковременных импульсов магнитного поля амплитудой до 0,8 Тл на фоне постоянного поля. Проведенный анализ подтвердил достижимость магнитного поля 0,8 Тл в течение 50 мс.

Кроме того, выполненный сравнительный анализ теплоносителей показал перспективность использования натрия на следующих этапах программы для экспериментов, не требующих детального измерения полей скорости, что позволит приблизить условия моделирования к параметрам реальных энергетических установок.

Список источников

1. Khodak A. et al. Virtual prototyping of liquid metal blanket performance in fusion pilot plant // *Fusion Eng. Des.* 2023. Vol. 191.
2. Kim B.-Y. et al. Overview of Recent Iter TBM Port Plug R&D Activities // *Fusion Eng. Des.* 2023. Vol. 189.
3. Barrett T.R. et al. CHIMERA Fusion Technology Facility: Testing and Virtual Qualification // *Fusion Sci. Technol.* 2023. pp. 1–12.
4. Taylor C.N. et al. The Tritium Extraction eXperiment (TEX): A forced convection fusion blanket PbLi loop // *Fusion Eng. Des.* 2023. Vol. 192.
5. Koehly C., Bühler L., Courtessole C. Design of a scaled mockup of the WCLL TBM for MHD experiments in liquid metal manifolds and breeder units // *Fusion Eng. Des.* 2023. Vol. 192.
6. Ivanova-Stanik I. et al. Divertor power spreading in the Divertor Tokamak Test facility for a full power scenario with Ar and Ne seeding // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2023. Vol. 65. № 5.
7. De Castro A. et al. Physics and Technology Research for Liquid-Metal Divertor Development, Focused on a Tin-Capillary Porous System Solution, at the OLMAT High Heat-Flux Facility // *J. Fusion Energy.* 2023. Vol. 42, № 2. pp. 45.
8. Tanke V.F.B. et al. LiMeS-Lab: An Integrated Laboratory for the Development of Liquid-Metal Shield Technologies for Fusion Reactors // *J. Fusion Energy.* 2023. Vol. 42, № 2. pp. 44.
9. Takeda S. et al. UNITY: Kyoto Fusion Engineering's Unique Integrated Testing Facility for Fusion Power Generation // *Fusion Sci. Technol.* 2023. pp. 1–6.
10. Hon A.Yu. et al. Lead-lithium facility with superconducting magnet for MHD/HT tests of liquid metal breeder blanket // *Fusion Eng. Des.* 2017. Vol. 124. pp. 832–836.
11. Hollmann E.M. et al. Status of research toward the ITER disruption mitigation system // *Phys. Plasmas.* 2015. Vol. 22. № 2.
12. Abdou M., Morley N. B., Smolentsev S. et al. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO // *Fusion Eng. Des.* 2015. Vol. 100. pp. 2–43.
13. Zikanov O. et al. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields // *Appl. Mech. Rev.* 2021. Vol. 73, № 1.
14. Батенин В.М. и др. Развитие экспериментальной базы для исследований МГД-теплообмена перспективных ядерных энергоустановок // *Теплофиз. выс. темп.* 2015. Т. 53. № 6. С. 934.

15. Bobkov V. et al. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. Vienna: IAEA, 2008. pp. 18–21.
16. Akhmedagaev R. et al. Magnetoconvection in a horizontal duct flow – A parametric study // *Int. J. Therm. Sci.* 2023. Vol. 194.
17. Belyaev I. et al. Limits of strong magneto-convective fluctuations in liquid metal flow in a heated vertical pipe affected by a transverse magnetic field // *Int. J. Therm. Sci.* 2021. Vol. 161.
18. Zhang X., Zikanov O. Convection instability in a downward flow in a vertical duct with strong transverse magnetic field // *Phys. Fluids.* 2018. Vol. 30. № 11.
19. Беляев И.А., Лучинкин Н.А., Листратов Я.И. Формирование входного профиля течения для пассивного управления магнитогидродинамическим потоком жидкого металла в канале // *Теплофиз. выс. темп.* 2023. Т. 61. № 3. С. 452–464.
20. Belyaev I. et al. Effects of symmetry on magnetohydrodynamic mixed convection flow in a vertical duct // *Phys. Fluids.* 2020. Vol. 32. № 9.
21. ITER EDA N.J.W.S., et al. MHD stability, operational limits and disruptions. 1999.
22. Smolyanov I.A. et al. Numerical simulation of flux expulsion in a plain channel MHD flow // *Comput. Continuum Mech.* 2025.
23. Верещагина Т.Н., Логинов Н.И. ЛИТИЙ, ИЛИ СВИНЕЦ-ЛИТИЙ? // *Вопр. атом. науки и техн. Сер.: Ядер.-реактор. конст.* 2018. № 3. С. 86–90.
- Capillary Porous System Solution, at the OLMAT High Heat-Flux Facility. *J Fusion Energy.* 2023;42(2):45.
8. Tanke VFB et al. LiMeS-Lab: An Integrated Laboratory for the Development of Liquid–Metal Shield Technologies for Fusion Reactors. *J Fusion Energy.* 2023; 42(2):44.
9. Takeda S et al. UNITY: Kyoto Fusion Engineering’s Unique Integrated Testing Facility for Fusion Power Generation. *Fusion Sci Technol.* 2023:1–6.
10. Hon A Yu et al. Lead-lithium facility with superconducting magnet for MHD/HT tests of liquid metal breeder blanket. *Fusion Eng Des.* 2017;124:832–836.
11. Hollmann EM et al. Status of research toward the ITER disruption mitigation system. *Phys Plasmas.* 2015;22(2).
12. Abdou M, Morley NB, Smolentsev S et al. Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO. *Fusion Eng Des.* 2015;100:2–43.
13. Zikanov O et al. Mixed convection in pipe and duct flows with strong magnetic fields. *Appl Mech Rev.* 2021;73(1).
14. Batenin VM et al. Development of experimental base for MHD heat transfer studies of advanced nuclear power plants. *Teplofiz Vys Temp.* 2015;53(6):934.
15. Bobkov V et al. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data. Vienna: IAEA; 2008. p. 18–21.
16. Akhmedagaev R et al. Magnetoconvection in a horizontal duct flow – A parametric study. *Int J Therm Sci.* 2023;194.
17. Belyaev I et al. Limits of strong magneto-convective fluctuations in liquid metal flow in a heated vertical pipe affected by a transverse magnetic field. *Int J Therm Sci.* 2021;161.
18. Zhang X, Zikanov O. Convection instability in a downward flow in a vertical duct with strong transverse magnetic field. *Phys Fluids.* 2018;30(11).
19. Belyaev IA, Luchinkin NA, Listratov YI. Formation of inlet flow profile for passive control of liquid-metal magnetohydrodynamic flow in a channel. *Teplofiz Vys Temp.* 2023;61(3):452–464.
20. Belyaev I et al. Effects of symmetry on magnetohydrodynamic mixed convection flow in a vertical duct. *Phys Fluids.* 2020;32(9).
21. ITER EDA NJWS et al. MHD stability, operational limits and disruptions. 1999.
22. Smolyanov IA et al. Numerical simulation of flux expulsion in a plain channel MHD flow. *Comput Continuum Mech.* 2025.
23. Vereshchagina TN, Loginov NI. Lithium or lead-lithium? *Vopr At Nauki Tekh, Ser: Yad Reakt Konst.* 2018;(3): 86–90.

References

1. Khodak A et al. Virtual prototyping of liquid metal blanket performance in fusion pilot plant. *Fusion Eng Des.* 2023;191.
2. Kim B-Y et al. Overview of Recent Iter TBM Port Plug R&D Activities. *Fusion Eng Des.* 2023;189.
3. Barrett TR et al. CHIMERA Fusion Technology Facility: Testing and Virtual Qualification. *Fusion Sci Technol.* 2023:1–12.
4. Taylor CN et al. The Tritium Extraction eXperiment (TEX): A forced convection fusion blanket PbLi loop. *Fusion Eng Des.* 2023;192.
5. Koehly C, Bühler L, Courtessole C. Design of a scaled mockup of the WCLL TBM for MHD experiments in liquid metal manifolds and breeder units. *Fusion Eng Des.* 2023;192.
6. Ivanova-Stanik I et al. Divertor power spreading in the Divertor Tokamak Test facility for a full power scenario with Ar and Ne seeding. *Plasma Phys Control Fusion.* 2023;65(5).
7. De Castro A et al. Physics and Technology Research for Liquid-Metal Divertor Development, Focused on a Tin-