

УДК 536.242;661.85

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ СВИНЕЦ-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ПРИ ВАРЬИРУЕМОМ СОДЕРЖАНИИ В НЁМ КИСЛОРОДА

*А.В. Безносков, С.Ю. Савинов, О.О. Новожилова, М.А. Антоненков**(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижний
Новгород)*

В статье представлены результаты экспериментального исследования полей скоростей при течении эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения в поперечном магнитном поле при варьлируемых характеристиках электроизолирующих покрытий и содержании кислорода в эвтектике. Испытания проводились при следующих режимных параметрах: температуре эвтектики свинец—висмут $T = 400\text{—}420\text{ }^{\circ}\text{C}$; термодинамической активности кислорода в теплоносителе $a = 10^{-4}\text{—}10^0$; расходе эвтектики через экспериментальный участок $Q = 1,8\text{—}3,0\text{ м}^3/\text{ч}$; среднерасходной скорости теплоносителя в экспериментальном участке $w = 1,0\text{—}1,7\text{ м/с}$; величине магнитной индукции $B = 0\text{—}0,65\text{ Тл}$; числе Рейнольдса $Re = (1,6\text{—}2,7)10^5$ и числе Гартмана $Ha = 0\text{—}365$.

Ключевые слова: термоядерный реактор, теплоноситель свинец—висмут, магнитное поле, профиль скорости.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LEAD-BISMUTH HEAT-CARRIER STREAM VELOCITY STRUCTURE IN THE CROSS-SECTION MAGNETIC FIELD AT A VARIED CONTENT OF OXYGEN ADMIXTURE. A.V. BEZNOSOV, S.Yu. SAVINOV, O.O. NOVOZHILOVA, M.A. ANTONENKOV. Results of experimental research of lead-bismuth heat-carrier stream velocity structure in the cross-section magnetic field at a varied content of oxygen admixture and characteristics of oxide electroinsulating covers are presented. Experimental studies were carried out for the following operation parameters: the lead-bismuth eutectics temperature $T = 400\text{—}420\text{ }^{\circ}\text{C}$; thermodynamic activity of oxygen in the coolant $a = 10^{-4}\text{—}10^0$; the eutectics flow rate through the experimental part $Q = 1.8\text{—}3.0\text{ м}^3/\text{h}$, the coolant velocity in the experimental part $w = 1.0\text{—}1.7\text{ м/с}$; the magnetic induction value $B = 0\text{—}0.65\text{ Т}$; the Reynolds number $Re = (1.6\text{—}2.7)10^5$ and the Hartmann number $Ha = 0\text{—}365$.

Key words: thermonuclear reactor, lead-bismuth heat-carrier, magnetic field, stream velocity structure/

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые жидкие металлы (свинец, галлий, эвтектики свинец—висмут и свинец—литий) являются перспективным теплоносителем для энергонапряжённых элементов термоядерного реактора (ТЯР) бланкета и дивертора. Течение теплоносителя в элементах ТЯР происходит в мощном магнитном поле, которое необходимо для удержания плазмы. При течении тяжёлых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) в магнитном поле происходят изменение структуры потока, перестройка полей давлений и температур, что, в свою очередь, приводит к изменению характеристик теплообмена между теплоносителем и стенкой канала и изменению гидравлического сопротивления канала [1—3]. Степень влияния магнитного поля на поток ТЖМТ можно изменять путём формирования или деформирования на стенках каналов, ограничивающих поток жидкого металла, оксидных электроизолирующих покрытий (ЭИП). Данные вопросы в значительной степени мало изучены и требуют проведения комплекса теоретических и экспериментальных работ.

Цель данной работы — исследование поля скорости при течении эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения в поперечном магнитном поле при целенаправленно изменяемых характеристиках ЭИП на стенках канала.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА И ДАТЧИКА СКОРОСТИ

Для достижения поставленной цели в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, на кафедре «Атомные, тепловые станции и медицинская инженерия» создан высокотемпературный жидкометаллический стенд ФТ1 (рис. 1). В состав стенда входит экспериментальный

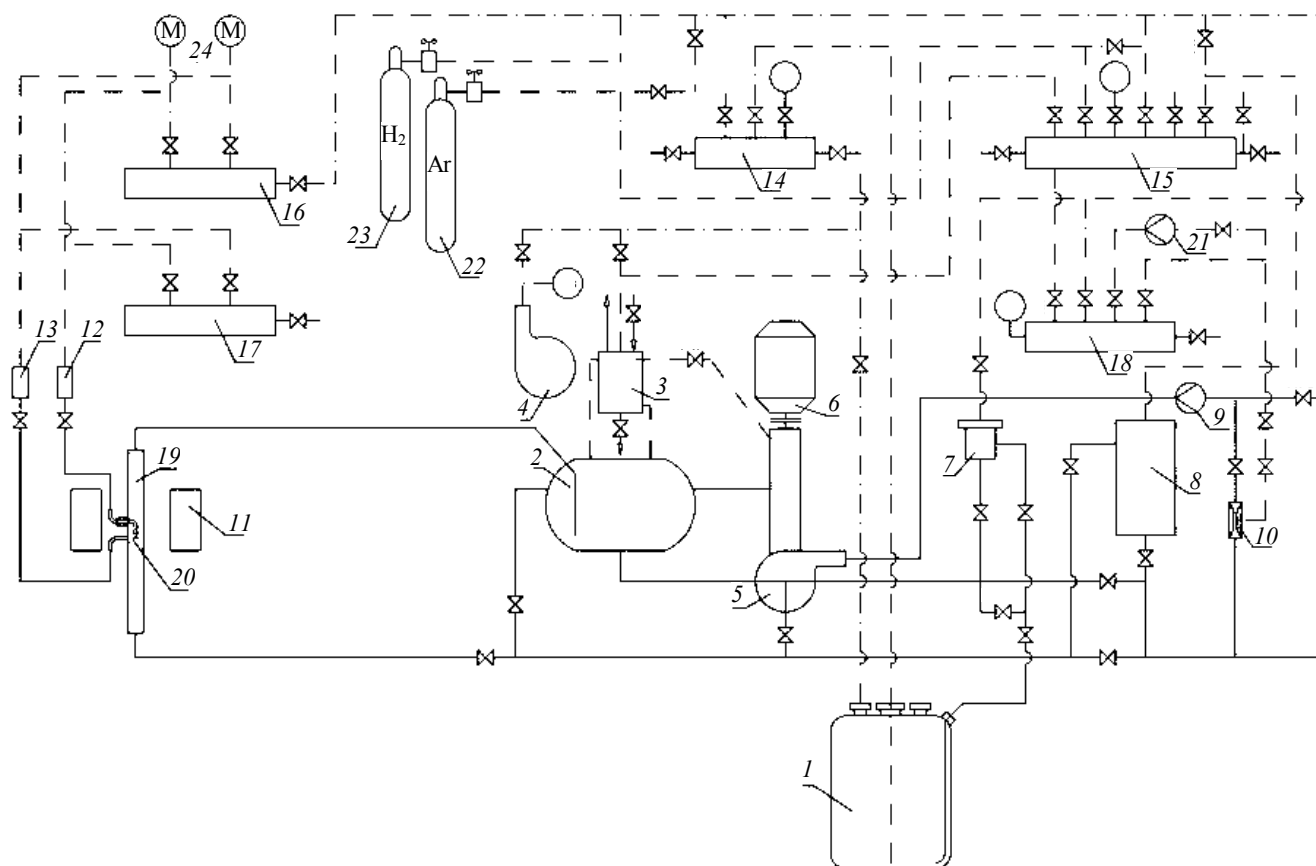


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — плавильный бак; 2 — буферная емкость; 3 — конденсатор; 4 — вакуумный насос; 5 — жидкометаллический насос; 6 — электродвигатель насоса; 7 — фильтр; 8 — мерная емкость; 9 — расходомер; 10 — эжектор; 11 — электромагнит; 12 — бачок измерения полного напора; 13 — бачок измерения потенциального напора; 14 — коллектор плавильного бака; 15 — коллектор низкого давления; 16, 17 — коллекторы перепада давления; 18 — коллектор эжектора; 19 — экспериментальный участок; 20 — датчик скорости; 21 — газовый расходомер; 22 — баллон с аргоном; 23 — баллон с водородом, 24 — манометры

участок 19 с устройством измерения локального значения скорости по сечению канала 20 (датчик скорости), установленный в зазор электромагнита 11 (см. рис. 1). Экспериментальный участок (ЭУ) выполнен из трубы (материал трубы — аустенитная сталь 08X18H10T) внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 26$ мм и толщиной стенки $\delta = 3$ мм. Участок гидродинамической стабилизации от начала прямого участка экспериментальной сборки до датчика скорости составлял $L = 20d_{\text{вн}}$. Измерение поля скорости производилось в плоскости, перпендикулярной силовым линиям магнитного поля.

Конструкция датчика скорости представлена на рис. 2. Датчик позволяет измерять потенциальный $H_{\text{пот}}$ и полный $H_{\text{пол}}$ напор потока тяжелого жидкого металла. По разности полного и потенциального напоров вычисляется значение локальной скорости потока эвтектики. Измерение полного напора осуществлялось с помощью капиллярной трубки 1 (внутренний диаметр трубки $d_{\text{вн}} = 1$ мм, толщина стенки $\delta = 0,25$ мм). Свободный конец трубки направлен навстречу потоку эвтектики свинец—висмут, другой конец капиллярной трубки заделан в обтекатель зонда 2. Через капиллярную трубку и систему трубопроводов эвтектика попадает в бачок измерения полного напора потока. Измерение потенциального напора осуществляется через отверстие 3 в стенке экспериментального участка. Свободный конец капиллярной трубки и отверстие для измерения потенциального напора в стенке находятся в одном сечении трубы.

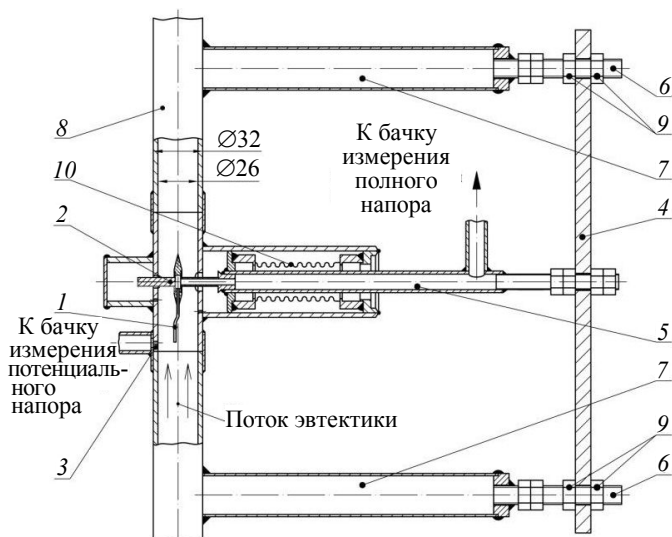


Рис. 2. Схема датчика скорости: 1 — капиллярная трубка; 2 — зонд; 3 — отверстие измерения потенциального напора; 4 — дистанционирующая пластина; 5 — трубка соединительная; 6 — шпильки дистанционирующие; 7 — штанги опорные; 8 — труба экспериментального участка; 9 — гайки перемещающие; 10 — сифон



Рис. 3. Датчик скорости до установки в ЭУ

Бачки измерения полного и потенциального напоров сообщались по газу. В них создавалось давление газа, при котором в каждом из отжимных бачков устанавливался уровень теплоносителя. После этого электроконтактные стержни перемещались до касания нижнего конца со свободным уровнем жидкого металла во внутренней полости бачка, при этом срабатывала световая сигнализация и фиксировалось положение электроконтактных стержней. Измеренная штангенциркулем по положению электроконтактных стержней разность столбов жидкости в бачках являлась динамическим напором H_d жидкости в текущей точке — оси обреза капилляра. При обработке результатов измерения в пристенной области с значительным градиентом динамического напора в поперечном сечении капилляра принималось положение точки измерения, соответствующей точке на внутренней поверхности капилляра, наиболее близкой к оси ЭУ. Это допущение несколько завышает положение точки на графике $V/V_{cp} = f(r/r_0)$.

Значение локальной скорости рассчитывалось по полученному из уравнения Бернулли выражению $V = (2gH_d)^{0,5}$, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения; $H_d = H_{пол} - H_{пот}$ — динамический напор, м; $H_{пол}$ — полный напор, м; $H_{пот}$ — потенциальный напор, м.

Экспериментальные исследования проводились при следующих режимных параметрах: температура эвтектики свинец—висмут $T = 400\text{—}420 \text{ }^\circ\text{C}$; термодинамическая активность кислорода (ТДАК) в теплоносителе $a = 10^{-4}\text{—}10^0$; расход эвтектики через экспериментальный участок $Q = 1,8\text{—}3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$; средняя скорость теплоносителя в экспериментальном участке $w = 1,0\text{—}1,7 \text{ м/с}$; величина магнитной индукции $B = 0\text{—}0,65 \text{ Тл}$; число Рейнольдса $Re = (1,6\text{—}2,7)10^5$; число Гартмана $Ha = 0\text{—}365$. Значение расхода в реальном времени определялось магнитным расходомером, тарируемым не реже одного раза в сутки объёмным методом.

Эксперимент состоял из нескольких этапов, на каждом из которых достигалось и выдерживалось определённое значение термодинамической активности в эвтектике свинец—висмут, после чего проводился замер поля скоростей.

Через отверстие измерения потенциального напора эвтектика через систему трубопроводов попадает в бачок измерения потенциального напора.

Перемещение капилляра в радиальном направлении по сечению канала осуществляется путём перемещения дистанционирующей пластины 4 с помощью гаек 9. Дистанционирующая пластина соединена с трубкой 5, на другом конце которой закреплён зонд 2 с капиллярной трубкой 1.

Бачки измерения полного и потенциального напоров выполнены вертикальными из одинаковых участков труб, внутренний диаметр которых составляет $d_{вн} = 25 \text{ мм}$, толщина стенки $\delta = 3,5 \text{ мм}$, длина $l = 500 \text{ мм}$. К днщу каждого из бачков подведена соответствующая трасса измерения напора (полного или потенциального). В крышке каждого бачка устанавливается узел уплотнения передвижного электроконтактного стержня. Газовая система бачков позволяет изменять величину давления газа в обоих бачках или в каждом по отдельности. На рис. 3 представлена фотография датчика скорости до установки в экспериментальный участок.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерение разности между полным и потенциальным напорами во время проведения эксперимента осуществлялось следующим образом.

Изменение содержания кислорода в эвтектике свинец—висмут и характеристик оксидных электроизолирующих покрытий достигалось путём ввода в систему газа стэнда водорода или кислорода (в составе атмосферного воздуха).

В режиме с установленной термодинамической активностью кислорода в эвтектике и содержанием кислорода в контуре производился замер поля скоростей при трёх различных значениях расхода эвтектики через ЭУ в диапазоне $Q = 1,8—3,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (скорость теплоносителя в ЭУ $w = 1,0—1,7 \text{ м/с}$). При каждом установленном и поддерживаемом расходе определялось значение локальных скоростей по сечению канала при трёх значениях величины магнитной индукции $B = 0, 0,5, 0,65 \text{ Тл}$. При каждом значении расхода эвтектики и величины магнитной индукции поперечного магнитного поля замер локальных значений скоростей производился в шести точках по сечению канала при следующих положениях оси капиллярной трубки зонда по радиусу канала: $r = 0,75$ (капиллярная трубка касается внутренней поверхности канала ЭУ), 1,75, 3,75, 6,75, 9,75, 13 мм (ось капиллярной трубки совпадает с осью канала ЭУ). Экспериментально полученные поля скоростей при течении эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения в поперечном сечении представлены в виде графических зависимостей $V = f(r)$, $V/V_{cp} = f(r/r_0)$ (где r — текущий радиус, $r_0 = 13 \text{ мм}$ — радиус трубы экспериментального участка, V_{cp} — среднее значение скорости, рассчитанное как среднее арифметическое измеренных значений локальной скорости по сечению канала) при различных значениях термодинамической активности кислорода, числах Re и Ha.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наибольшая степень влияния поперечного магнитного поля на поток эвтектики обнаружена в режиме с уменьшением термодинамической активности кислорода в эвтектике до $a = 10^{-5}—10^{-4}$. В этом режиме происходило ухудшение характеристик электроизолирующих покрытий. На рис. 4 представлен график полей скоростей в безразмерных координатах, полученный при $a = 10^{-4}$, $Re = 1,91 \cdot 10^5$ и трёх различных значениях критерия Ha (величины магнитной индукции). В данном режиме отмечено заметное изменение величины локальной скорости у стенки канала ЭУ и в ядре потока. С увеличением величины магнитной индукции поперечного магнитного поля зафиксировано уменьшение величины локальной скорости в пристенной области (2,5—3 мм от поверхности канала ЭУ). В ядре потока увеличение магнитной индукции приводило к росту величины локальной скорости. В целом в данном режиме с увеличением величины магнитной индукции профиль скорости приобретал более «вытянутую», параболическую форму по сравнению с профилем скорости при течении эвтектики в отсутствие поперечного магнитного поля. Вероятно, в данном режиме эффект подавления турбулентных пульсаций поперечным магнитным полем преобладал над эффектом Гартмана, связанным с уплощением профиля скорости, что приводило к ламинаризации потока и формированию профиля скорости параболического вида.

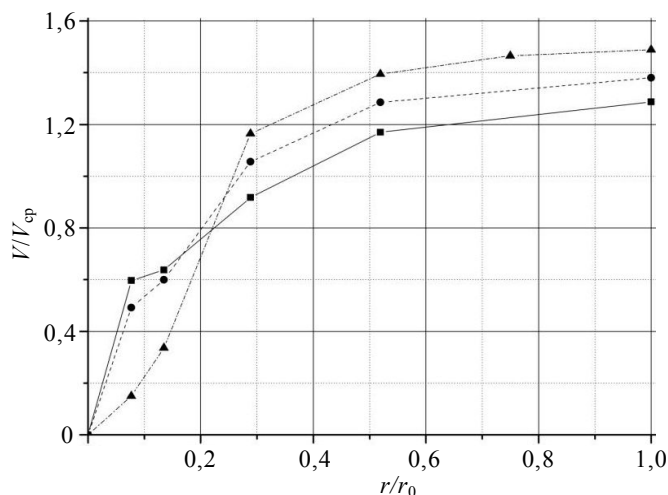


Рис. 4. Профиль скорости $V/V_{cp} = f(r/r_0)$, $a = 10^{-4}$, 45 ч работы стэнда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 1,91 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 280$, $Re = 1,91 \cdot 10^5$; ▲ — $Ha = 375$, $Re = 1,91 \cdot 10^5$

В режиме с термодинамической активностью кислорода в эвтектике $a = 10^{-5}—10^{-4}$ отмечено влияние поперечного магнитного поля на поток теплоносителя во всём диапазоне реализованных в эксперименте значений чисел Рейнольдса (скоростей теплоносителя). На рис. 5, 6 представлены профили скорости, измеренные в режиме с $a = 10^{-5}—10^{-4}$, при двух крайних значениях числа Re, реализованных в эксперименте. В обоих случаях отмечено изменение профиля в пристеночной области и ядре потока. При увеличении расхода эвтектики свинец—висмут через ЭУ было отмечено возрастание величины разности между локальными значениями скорости в пристеночной области при течении эвтектики в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле. При значениях числа $Re \sim 2 \cdot 10^5$ профиль скорости в ядре потока при течении в магнитном поле выходил на плато, в то время как в отсутствие магнитного поля значение локальной скорости в ядре потока монотонно возрастало и достигало максимума в его центре.

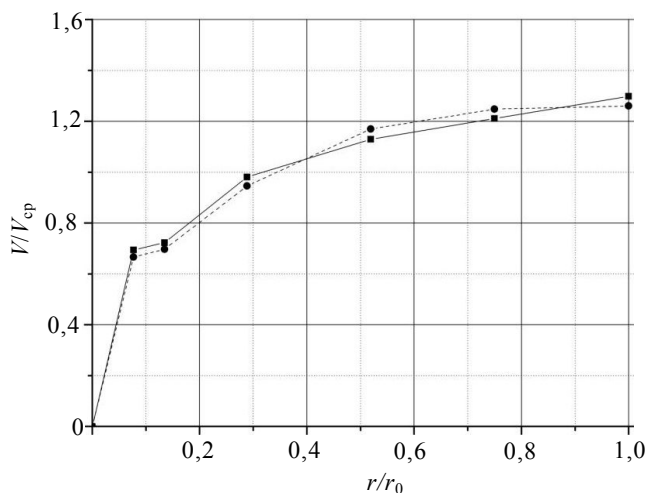


Рис. 5. Профиль скорости $V/V_{cp} = f(r/r_0)$, $a = 10^{-4}$, 70 ч работы стенда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 1,81 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 280$, $Re = 1,81 \cdot 10^5$

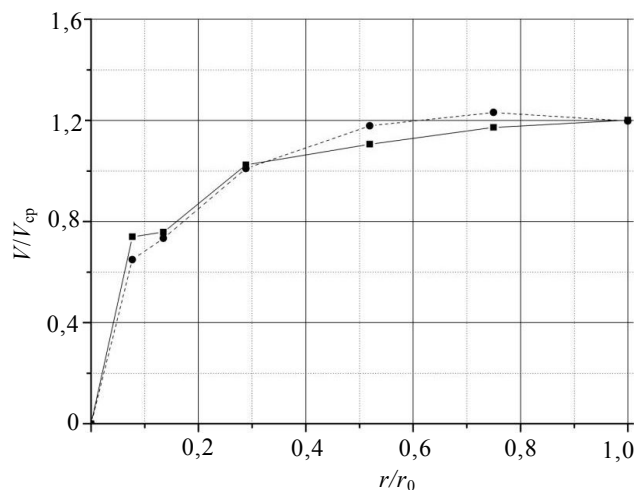


Рис. 6. Профиль скорости $V/V_{cp} = f(r/r_0)$, $a = 10^{-4}$, 70 ч работы стенда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 2,79 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 280$, $Re = 2,79 \cdot 10^5$

Наибольшая степень влияния поперечного магнитного поля на поток эвтектики в режиме с $a = 10^{-5}$ — 10^{-4} отмечена в начале эксперимента (45 ч от начала циркуляции теплоносителя, см. рис. 4). В дальнейшем (70 ч от начала циркуляции теплоносителя, см. рис. 5, 6) при той же ТДА кислорода происходило некоторое снижение степени влияния магнитного поля. Вероятно, это вызвано тем, что первоначально экспериментальный участок устанавливался в стенд без сформированных на его стенках оксидных электроизолирующих покрытий и в начальный период эксперимента влияние магнитного поля было максимально. В дальнейшем происходило формирование ЭИП, что в свою очередь привело к некоторому снижению степени влияния поперечного магнитного поля на поток эвтектики при неизменной активности кислорода в теплоносителе.

В режиме с содержанием кислорода в эвтектике, близким к насыщению (термодинамическая активность кислорода в эвтектике $a = 10^0$), обнаружено более слабое влияние поперечного магнитного поля на поток теплоносителя по сравнению с режимом с ТДАК $a = 10^{-4}$. Это однозначно объясняется увеличением электросопротивления электроизолирующих покрытий на стенках канала. На рис. 7, 8 представлены профили скоростей, измеренные при $a = 10^0$, $Re = 1,7 \cdot 10^5$, $1,81 \cdot 10^5$ и трёх различных значениях критерия Гартмана. При значении числа Гартмана $Ha = 275$ (см. рис. 7) профиль скорости практически соответствует профилю скорости при течении эвтектики в отсутствие магнитного поля. При достижении значения критерия Гартмана $Ha = 370$ (см. рис. 8) отмечено изменение профиля скорости, уменьшение значения локальной скорости потока в пристенной области канала ЭУ. По форме профили скорости в ядре потока при течении в магнитном поле и в отсутствие магнитного поля схожи.

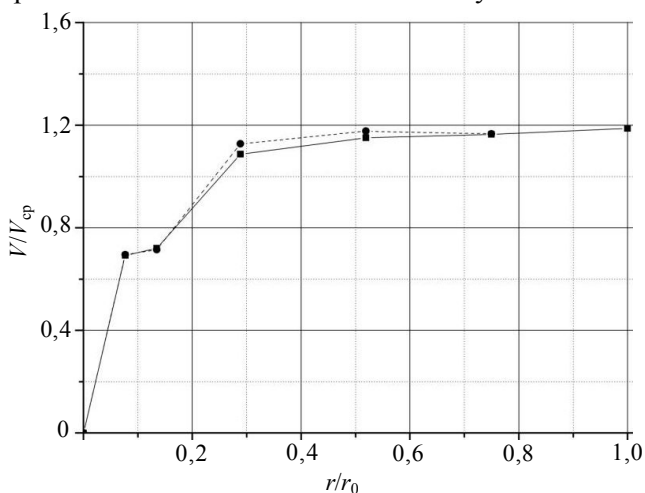


Рис. 7. Профиль скорости $V/V_{cp} = f(r/r_0)$, $a = 10^0$, 210 ч работы стенда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 1,81 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 275$, $Re = 1,81 \cdot 10^5$

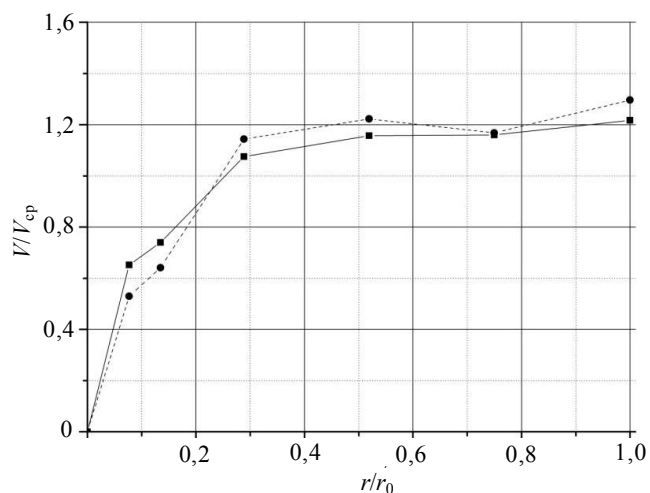


Рис. 8. Профиль скорости $V/V_{cp} = f(r/r_0)$, $a = 10^0$, 187 ч работы стенда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 1,7 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 370$, $Re = 1,7 \cdot 10^5$

В режимах с ТДАК $a = 10^0$ во всём диапазоне чисел Рейнольдса, реализуемых в эксперименте, наложение на поток внешнего поперечного магнитного поля приводило к уменьшению величины локальной скорости в пристенной области. Профиль скорости в ядре потока по форме соответствовал профилю при течении вне магнитного поля. На рис. 8 и 9 представлены профили скорости, измеренные при ТДАК $a = 10^0$ и критерии $Ha = 370$ для двух значений числа Рейнольдса.

Меньшую степень влияния поперечного магнитного поля на поток эвтектики свинец—висмут в режиме с термодинамической активностью кислорода в теплоносителе $a = 10^0$ по сравнению с режимом с $a = 10^{-4}$ можно объяснить следующим. Увеличение содержания кислорода в эвтектике приводит к формированию и доформированию (улучшению характеристик) на стенках экспериментального участка оксидных электроизолирующих покрытий, обладающих большим электрическим сопротивлением. Характеристики покрытий оказывают существенное влияние на электропроводимость стенок каналов в целом, что приводит к снижению степени влияния поперечного магнитного поля на поток эвтектики.

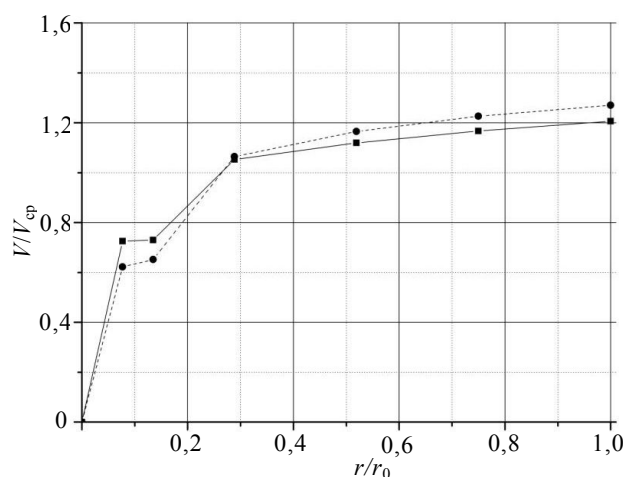


Рис. 9. Профиль скорости $V/V_{ср} = f(r/r_0)$, $a = 10^0$, 187 ч работы стенда: ■ — $Ha = 0$, $Re = 2,92 \cdot 10^5$; ● — $Ha = 370$, $Re = 2,77 \cdot 10^5$

ВЫВОДЫ

Впервые проведено исследование поля скорости при течении высокотемпературной эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения в поперечном магнитном поле при варьируемых характеристиках оксидных электроизолирующих покрытий на стенках канала, ограничивающих поток жидкого металла.

Поперечное магнитное поле оказывает заметное влияние на поле скоростей потока эвтектики свинец—висмут в канале круглого сечения при следующих режимных параметрах: $T = 400—420$ °C; $a = 10^{-4}—10^0$; $Re = (1,6—2,7)10^5$; $Ha = 0—365$. Наибольшее влияние на профиль скорости поперечное магнитное поле оказывает при термодинамической активности кислорода в эвтектике $a = 10^{-4}$, наименьшее — при $a = 10^0$.

Обработка эвтектики свинец—висмут газообразным кислородом приводит к формированию и доформированию на стенках каналов, ограничивающих поток жидкого металла, оксидных электроизолирующих покрытий и, возможно, концентрации частиц оксидов эвтектики в пристенной области. Оксидные ЭИП оказывают существенное влияние на поле скорости при течении эвтектики в поперечном магнитном поле.

Варьирование характеристик электроизолирующих покрытий (удельное электрическое сопротивление, толщина) на стенках каналов, ограничивающих поток тяжелого жидкого металла, путем обработки теплоносителя кислородом или водородом приводит к изменению степени влияния поперечного магнитного поля на поле скоростей в поперечном сечении потока.

Получены профили скорости по сечению экспериментального участка при течении эвтектики свинец—висмут в поперечном магнитном поле и вне поля при различных значениях содержания кислорода в теплоносителе, характеристиках оксидных ЭИП и расходах через ЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безносов А.В., Савинов С.Ю., Молодцов А.А., Назаров А.В., Бокова Т.А., Муравьев Е.В. Экспериментальные исследования теплопереноса к свинец-висмутовому теплоносителю в поперечном магнитном поле при изменяемых характеристиках электроизолирующих покрытий на ограничивающих стенках. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 1, с. 25—32.
2. Семёнов А.В., Безносов А.В., Молодцов А.В., Константинов В.Л., Баранова О.В. Экспериментальные исследования теплоотдачи к эвтектике свинец—литий и коррозионных свойств. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, вып. 2, с. 40—49.
3. Безносов А.В., Пинаев С.С., Молодцов А.А., Муравьев Е.В. Снижение МГД-сопротивления в каналах с жидкометаллическими теплоносителями в магнитном поле бланкета и дивертора токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2004, вып. 1, с. 3—10.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2008 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2008, вып. 4, с. 56—61.