УДК 621.311.25:621.039

Экспериментальное исследование свободной конвекции жидкого металла в прямоугольном канале с градиентом температуры

Н.А. Прибатурин¹, П.Д. Лобанов², В.С. Бердников², А.С. Курдюмов², А.И. Светоносов², И.А. Евдокименко²

¹ИБРАЭ РАН, Москва

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: nialp@mail.ru, lobanov@itp.nsc.ru

Проведены измерения распределения температуры при развитии естественной конвекции в вертикальной прямоугольной полости высотой 364 мм, шириной 185 мм и глубиной 40 мм, заполненной свинцово-висмутовым расплавом, на вертикальных боковых стенках которой поддерживается перепад температуры. Путем изменения электрической мощности, подводимой к нагреваемой стенке, и, соответственно, изменением отводимого от противоположной стенки тепла задавался начальный перепад температуры. Измерения проводились в квазистационарном режиме свободной конвекции, при котором параметры течения и распределения температурр по сечению полости являлись постоянными в течение нескольких часов. В результате выполненных измерений получены профили температуры по ширине и глубине прямоугольной полости.

Ключевые слова: эксперимент, свободная конвекция, жидкий металл, температура.

Введение

Изучение развития свободной конвекции в жидком металле большой плотности представляет собой важное направление, поскольку напрямую связано с охлаждением металлического теплоносителя при нарушении его циркуляции в контуре реакторной установки.

Целью работы является проведение экспериментальных исследований по развитию свободной конвекции тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) в прямоугольной вертикальной полости с градиентом температуры по ее поперечному сечению. В такой геометрии противоположные узкие вертикальные боковые стенки полости имеют температуру, отличную от температуры расплава. Температура одной из них превышает температуру расплава, температура другой меньше температуры расплава. Тем самым моделируется подвод и сток тепла. На горячей стенке полости формируется тепловой пограничный слой, а на холодной теплоноситель теряет свою температуру, вследствие чего в объеме полости возникает циркуляционное конвективное движение теплоносителя. Такое течения сред с большими

[©] Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Бердников В.С., Курдюмов А.С., Светоносов А.И., Евдокименко И.А., 2022

Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Бердников В.С., Курдюмов А.С., Светоносов А.И., Евдокименко И.А.

числами Прандтля, такими как воздух, вода, спирт. Так, в цикле работ, выполненных в Институте теплофизики СО РАН, исследовалась структура свободно-конвективного течения жидкостей с большим числом Прандтля в плоском вертикальном канале с градиентом температуры. Важнейшие результаты этих работ были обобщены в обзоре [1]. Развитие свободно-конвективного течения жидкости с очень низким числом Прандтля, характерным для жидких металлов, практически не изучено. Экспериментальные исследования свободной конвекции выполнялись для жидкого натрия, например, в работе [2], для галлистана [3] и в ограниченном объеме для олова и галлия [4].

В работе [2] экспериментально исследовалась турбулентная свободная конвекция жидкого натрия в прямой теплоизолированной трубе, длина которой равнялась 20 её диаметрам, с торцевыми теплообменниками, обеспечивающими фиксированный перепад температуры. Эксперименты выполнялись для фиксированного числа Рэлея Ra = 2,4·10⁶ и различных углов наклона трубы к вертикали. Была выявлена сильная зависимость мощности, передаваемой вдоль трубы, от угла наклона, и обнаружено, что число Нуссельта в исследованном диапазоне углов наклона изменяется на порядок.

В работе [3] выполнялись детальные измерения компонент скорости и температуры в турбулентном конвекционном потоке галлистана (при числе Прандтля Pr = 0,029) с числами Рэлея $10^6 < Ra < 6 \cdot 10^7$. В работе проводились длительные измерения полностью турбулентного конвективного потока в закрытой цилиндрической ячейке с отношением длины ячейки к ее диаметру, равным единице. В измерениях использовался ультразвуковой метод определения скорости и измерения распределения температуры в ячейке с помощью термопар.

Работа [4] посвящалась совместным экспериментальному и численному исследованиям теплообмена при естественной конвекции жидкости в вертикальных полостях, заполненных жидкими оловом и галлием. Эксперименты проводились в двух разных тестовых ячейках, в которых противоположные боковые стенки выдерживались при постоянных, но разных температурах, а остальные стенки ячеек были хорошо теплоизолированы. Выполненные измерения использовались для проверки результатов численных расчетов.

В результате анализа известных работ выявлено, что данные по развитию свободной конвекции при течении ТЖМТ (свинцово-висмутовый и свинцовый теплоносители) отсутствуют.

Экспериментальный стенд и метод измерения

Рабочий участок для проведения экспериментов был выполнен в виде вертикального прямоугольного канала, содержащего замкнутую полость (рис. 1). Внутренние размеры полости были следующие: высота 364 мм, ширина 185 мм, глубина 40 мм; толщина верхней и нижней стенок полости составляла 8 мм, боковых — 2,5 мм. Боковые пластины высотой 400 мм, шириной 400 мм и толщиной 8 мм полностью перекрывали поперечное сечение прямоугольного канала. Одна боковая пластина была приварена к прямоугольному каналу. Вторая пластина плотно прижималась через прокладку с использованием болтовых соединений. Тем самым была создана замкнутая прямоугольная полость. Для заполнения полости рабочим металлическим расплавом на верхнем торце прямоугольного канала был предусмотрен паз. Во время проведения экспериментов в этот паз вводилась термопара для измерения распределения температуры по высоте и ширине прямоугольной полости.

В качестве рабочей жидкости использовался эвтектический свинцово-висмутовый расплав (44,5 wt. % Pb + 55,5 wt % Bi), свойства которого хорошо известны [5].

Рис.1 Схема рабочего участка. Размеры приведены в мм.

Повышенное внимание уделялось обеспечению однородности температуры теплоносителя внутри прямоугольной полости. Для этого были использованы два плоских нагревателя, размеры которых составляли 400×400 мм, мощность каждого нагревателя равнялась 1 кВт при напряжении 220 В. Использование боковых стенок толщиной 8 мм и плоских нагревателей позволило обеспечить равномерную температуру по всему поперечному сечению прямоугольной полости.



В ходе выполнения экспериментов все элементы рабочего участка разогревались до рабочей температуры теплоносителя. Для поддержания постоянной температуры стенок полости использовался специально разработанный пропорционально-интегральнодифференцирующий регулятор, изготовленный на основе микроконтроллера ATmega328. Регулятор подавал управляющие сигналы на твердотельные реле, через которые включались нагреватели стенок. Регулировка электрической мощности, подводимой к стенкам, проводилась с использованием широтно-импульсной модуляции. Период включения равнялся двум секундам, что позволяло регулировать подводимую мощность с точностью 0,5 % номинальной мощности нагревателя.

Тепловое состояние свинцово-висмутового расплава внутри прямоугольной полости контролировалось с помощью термопары хромель-алюмель с размером спая 0,5 мм. Было проведено измерение инерционности системы нагрева и выхода температуры расплава в полости на требуемое значение. На рис. 2*a* приведен типичный временной график достижения рабочей температуры расплава. Как видно, выход на рабочий режим занимает около двух часов. За это время все переходные процессы, связанные с нагревом рабочего участка, заполненного свинцово-висмутовым расплавом, заканчиваются, расплав металла находится в равновесном состоянии, и его температура однородна по объему прямоугольной полости. На рис. *2b* приведено распределение температуры по ширине полости, измеренное на расстоянии 100 мм от её верхнего прямоугольного торца после достижения фазы тепловой стабилизации рабочего участка. Каждая точка на графике — это результат



Рис. 2 Изменение температуры расплава (a) и профиль температуры (b) по ширине полости.

Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Бердников В.С., Курдюмов А.С., Светоносов А.И., Евдокименко И.А.

трех последовательных измерений профиля температуры с периодом между измерениями 40 минут и с длительностью фиксации измерения в каждой точке 30 секунд.

Градиент температуры создавался после выхода температуры теплоносителя на равновесную температуру, которая составляла около 155 °С. Для подвода дополнительного тепла к вертикальной боковой стенке применялась нагревательная лента типа ЭНГЛ-1 с удельной мощностью нагрева 100 Вт/м, совмещенная с двумя ТЭН мощностью 300 Вт. Поскольку температура всех элементов установки существенно превышает температуру окружающего воздуха, то очевидно, что часть этого тепла рассеивается через теплоизоляцию. Оценка тепловых потерь, основанная на измерении температуры внешней поверхности рабочего участка и развития конвективного теплообмена с окружающим рабочий участок воздухом, указывает на максимально возможную величину этих потерь, равную 40-45 % уровня подводимой дополнительной электрической мощности. Отвод тепла осуществлялся с противоположной вертикальной стенки. Для этого вдоль нее сверху вниз через трубу квадратного сечения 35×35 мм продувался воздух. Труба была плотно прижата к вертикальной стенке прямоугольной полости. Температура воздуха измерялась на входе и выходе из трубы, тем самым оценивалось количество отводимого тепла. После включений источника тепла на вертикальной стенке и соответствующего отвода тепла на противоположной стенке рабочий участок установки выдерживался в течение приблизительно двух часов и только после этого начинались измерения распределения температуры теплоносителя внутри прямоугольной полости. Столько же времени было необходимо для перехода на другой режим разогрева.

Измерения локальной температуры теплоносителя выполнялись по ширине прямоугольной полости (оси *x*) на различных расстояниях от верхнего торца прямоугольной полости, равных 20, 40, 60, 80 и 100 мм. Шаг измерения по горизонтальной оси варьировался от 1 до 5 мм. Вблизи горячей и холодной стенок шаг измерения температуры составлял 1 и 2 мм, что позволяло фиксировать тепловой пограничный слой с достаточным пространственным разрешением. Время измерения температуры в определенной координате (каждой точке измерения) составляло 1 минуту. Измерения выполнялись термопарой с хорошим временным и пространственным разрешением. Сигнал термопары записывался через усилитель непосредственно в память компьютера и затем, после фильтрации наводок, определялась его средняя величина. Калибровка термопары перед началом каждого цикла измерений и после его окончания позволила добиться малой неопределенности измерения температуры теплоносителя, равной 0,2 градуса.

Результаты экспериментов

Физической особенностью естественной конвекции в замкнутых областях при боковом подогреве является взаимодействие восходящего и нисходящего конвективных потоков, в результате которого устанавливается выраженная вертикальная стратификация вдоль вертикальной оси и формируется довольно сложная и существенно зависящая от числа Рэлея и геометрии области вихревая структура течения.

На рис. 3 представлены типичные графики распределения температуры близи нагреваемой стенки при подводе к вертикальной стенке электрической мощности, равной 90 и 150 Вт, на расстоянии 60 мм от верхнего торца полости. Было выполнено по шесть повторных измерений для каждого из режимов. На обобщающих графиках приведены осредненные по результатам всех измерений в каждой точке данные и в виде вертикальных отрезков показаны их максимальные отклонения. Как видно из приведенных результатов,





вблизи горячей стенки существует линейный участок толщиной около 10 мм, в котором температура жидкости быстро понижается. В нелинейной внешней части теплового пограничного слоя виден участок с повышением температуры, что характерно для конвекции у вертикальной нагретой поверхности при наличии устойчиво стратифицированного ядра. Восходящий поток горячей жидкости во внешней части пограничного слоя за счет вязкого трения затягивает вверх относительно холодную жидкость ядра. Затем жидкость, не успевшая принять температуру вышележащих слоев жидкости, начинает опускаться и формирует слабоинтенсивный инверсный слой во внешней части пограничного слоя.

Оценка числа Релея в тепловом пограничном слое для приведенных режимов может быть выполнена с учетом следующих допущений. Температура на горячей стенке равна значению, получаемому путем линейной экстраполяции профиля температуры вблизи этой стенки. Градиент температуры вблизи стенки имеет значение $(dT/dx)_{ct} = \Delta T/\Delta x$, где Δx — расстояние от стенки, на котором сохраняется линейное уменьшение температуры теплоносителя. Число Релея Ra_Z = $(\beta g/a v) \cdot \Delta T \cdot L^3$ определяется по вертикальной координате L = (364 - z) по длине пограничного слоя, сформировавшегося на нагретой стенке. Для выполненных измерений распределений температуры вблизи нагреваемой стенки, приведенных на рис. 3, число Релея лежит в диапазоне $10^7 - 5 \cdot 10^7$.

По известному градиенту температуры вблизи стенки, определенному на высоте *z*, можно найти локальный тепловой поток $q = -\lambda (dT/dx)$. Он составляет значение порядка 3,0-3,5 кВт/м². Локальный коэффициент теплоотдачи, определенный по локальному тепловому потоку и по локальному перепаду температуры между стенкой и температурой во внешней области теплового пограничного слоя, записывается как $\alpha = q/\Delta T$ и составляет значение порядка 1,5 кВт/м²К. По этим значениям можно определить локальное число Нуссельта Nu = $\alpha L/\lambda$, где в качестве характерного размера *L* выступает вертикальная координата, равная (364 – *z*). Ее значение изменяется от 264 мм до 344 мм. В проведенных экспериментах число Нуссельта попадает в диапазон Nu = 20-27.

На рис. 4 приведены детализированные данные по распределению температуры по ширине полости, начиная от горячей стенки и до холодной. Измерения проведены с интервалом по расстоянию 2 мм, каждая точка на графиках является осредненной величиной температуры, измеряемой в течение 1 минуты. Измерения проводились с постепенным уменьшением уровня подводимой к нагреваемой стенке электрической мощности с целью достижения режима, при котором диапазон изменения температуры в тепловом

Прибатурин Н.А., Лобанов П.Д., Бердников В.С., Курдюмов А.С., Светоносов А.И., Евдокименко И.А.





пограничном слое будет настолько мал, что станет сопоставим с порядком погрешности измерения температуры. Минимальный режим по поперечному перепаду температуры между стенками прямоугольной полости показан на рис. 4*a*. Несмотря на небольшой градиент температуры, возле нагреваемой стенки формируется тепловой пограничный слой, а в полости существует естественная циркуляция теплоносителя. Длительность одного полного цикла измерений составляла около двух часов, измерения были повторены три раза.

При увеличении уровня подводимой мощности до 90 Вт интенсивность циркуляционного движения внутри полости росла. На нагреваемой стенке развивался устойчивый тепловой пограничный слой. Неоднократно проведенные повторы измерений продемонстрировали их совпадения между собой. На обобщенном графике, показанном на рис. 4*b*, приведены результаты указанных повторных измерений, выполненных при сохранении всех исходных параметров. Большое количество данных, полученных при общей длительности измерений порядка 8 часов, статистически хорошо отображает полное тепловое поле по ширине полости с учетом возможной погрешности. Ранее качественно подобные данные были получены в работе [6]. Оценка числа Релея, выполненная для характерного размера, равного ширине полости между нагреваемой и охлаждаемой стенками X = 185 мм, и перепада температуры, определяемого экстраполяцией профиля температуры вблизи стенок, приводит к значению $\operatorname{Ra}_x = (\beta g/a v) \cdot \Delta T \cdot X^3$ порядка $2 \cdot 10^7$. Многократность измерений и их повторяемость позволяет судить об установлении квазистационарного режима естественной конвекции в полости с разнотемпературными стенками.

Выводы

На практике реализован режим естественной циркуляции свинцово-висмутового расплава, имеющего температуру около 160 °C, в прямоугольной полости, на вертикальных противоположных стенках которой осуществляется подвод и сток тепла. Возникающее свободно-конвективное движение сплава приводит к формированию восходящего и нисходящего потоков жидкого металла соответственно возле нагреваемой и охлаждаемой стенок, формируя внутри полости циркуляционное движение.

В результате выполненных измерений получены профили температуры по ширине и глубине прямоугольной полости в зависимости от уровня подводимой электрической мощности к нагреваемой стенке. Для теплового пограничного слоя вблизи нагреваемой стенки получены детальные распределения температуры.

Список литературы

- 1. Kutateladze S.S., Berdnikov V.S. Structure of thermogravitational convection in flat variously oriented layers of liquid and on a vertical wall // Int. J. Heat Mass Transfer. 1984. Vol. 27, No. 9. P. 1595–1611.
- 2. Васильев А.Ю., Колесниченко И.В., Мамыкин А.Д., Фрик П.Г., Халилов Р.И., Рогожкин С.А., Пахолков В.А. Турбулентный конвективный теплообмен в наклонной трубе, заполненной натрием // Журн. техн. физики. 2015. Т. 85, вып. 9. С. 45–49.
- Teimurazov A., Frick P. Thermal convection of liquid metal in a long inclined cylinder // Physical Review Fluids. 2017. Vol. 2, No. 11. P. 113501-1–113501-13.
- 4. Zürner T., Schindler F., Vogt T., Eckert S., Schumacher J. Combined measurement of velocity and temperature in liquid metal convection // J. Fluid Mech. 2019. Vol. 876. P. 1108–1128.
- 5. Handbook on Lead–bismuth Eutectic Alloy and Lead Proper-ties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies. OECD/NEANuclear Science Committee Working Party on Scientific Issues of the Fuel CycleWorking Group on Lead–bismuth Eutectic. OECD-NEA, 2007.
- 6. Wolff F., Beckermann C., Viskanta R. Natural convection of liquid metals in vertical cavities // Thermal and Fluid Sci. 1988. Vol. 1, Iss. 1. P. 83–91.

Статья поступила в редакцию 18 февраля 2022 г., после доработки — 21 марта 2022 г., принята к публикации 22 марта 2022 г.