

03.1;03.2

Гидравлическое сопротивление круглой трубы при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле

© Н.А. Лучинкин¹, Н.Е. Балабаев², Л.А. Федосеев¹, Е.М. Шенягин², И.А. Беляев²¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия² Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: bia@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 5 июня 2024 г.

В окончательной редакции 5 июля 2024 г.

Принято к публикации 12 июля 2024 г.

Рассмотрены результаты экспериментального исследования влияния поперечного магнитного поля на гидравлическое сопротивление при течении ртути в круглой трубе при различной проводимости стенки. Исследованы изменения коэффициентов гидравлического сопротивления при числах Рейнольдса в диапазоне $Re = (10-40) \cdot 10^3$ и магнитных полях, реализующих числа Гартмана в диапазоне $Ha = 0-1800$. Рассмотрены трубы с различной толщиной стальной стенки, изучено влияние омеднения, направленного на улучшение электрического контакта на границе ртуть–сталь.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, гидравлическое сопротивление, жидкий металл, проводимость стенки, контактное электросопротивление.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58960.20012

Частью развития реакторных установок чистого синтеза (термоядерных реакторов) и гибридных систем (синтез–деление) [1] является использование жидких металлов для охлаждения высоконагруженных элементов реакторов и наработки ядерного топлива, применение которых сопряжено с различными трудностями и явлениями, изученными еще недостаточно подробно [2]. Один из эффектов — возрастание гидросопротивления каналов при течении проводящей среды в сильных магнитных полях. Данные о гидросопротивлении при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле для каналов с различной проводимостью стенок приводятся в нескольких источниках [3–6].

Исследования жидкометаллического теплообмена, осложненного влиянием магнитного поля, показывают, что не только гидросопротивление, но и теплообмен (включая возникновение магнитно-конвективных пульсаций) оказывается чувствительным к электрической проводимости стенки [2]. Основные данные получены в условиях лабораторных стендов с относительно слабой или практически отсутствующей проводимостью стенки [3]. При этом вопрос изменения электропроводности стенки на всем протяжении проводимых экспериментальных исследований подробно не оговаривается.

В настоящей работе решается задача об исследовании гидросопротивления в трубах с различной проводимостью стенки с подробным рассмотрением влияния электропроводности стенки, проверяется достоверность более ранних работ других авторов, отрабатывается методика измерения гидросопротивлений в жидких металлах и создается база надежных экспериментальных данных.

Реальный контакт ртути и нержавеющей стали имеет как термическое [7], так и электрическое [8] контактное сопротивление. Исследования показали, что контакт ртути и нержавеющей стали определяется посторонними к жидкому металлу слоями, образующимися в зоне контакта [8,9]. Возникновение этих слоев обусловлено химическим взаимодействием жидкометаллической среды с конструкционными материалами, а также электролитическими процессами при прохождении тока. В связи с этим протекание электрического тока через контактную зону происходит через множественные места пробоя пограничных контактных слоев. Механические воздействия на смоченную стенку (обработка щетками) и нанесение промежуточных слоев с лучшей смачиваемостью жидким металлом позволяют снизить контактное электрическое сопротивление.

Исследования проводились с помощью системы измерения перепадов давления (рис. 1). Система состоит из двух колб большого диаметра, заполненных водой, к которым подводятся шланги от отборов давления на рабочем участке. С ответных частей колб выводятся измерительные шланги, совмещенные с измерительной рулеткой. За счет разности внутренних диаметров колб ($d_1 = 72 \text{ mm}$) и шлангов ($d_2 = 6 \text{ mm}$) неразличимый перепад уровней по ртути вызывает существенный перепад уровней по воде, достаточный для проведения точных измерений даже при малых расходах. Перепад давлений вычислялся на основе следующего соотношения:

$$dP = \rho_w g H \left(\frac{\rho_{\text{Hg}} d_2^2}{\rho_w d_1^2} + 1 \right), \quad (1)$$

где ρ_w , ρ_{Hg} — плотности воды и ртути [kg/m^3], g — ускорение свободного падения [m/s^2], H — перепад

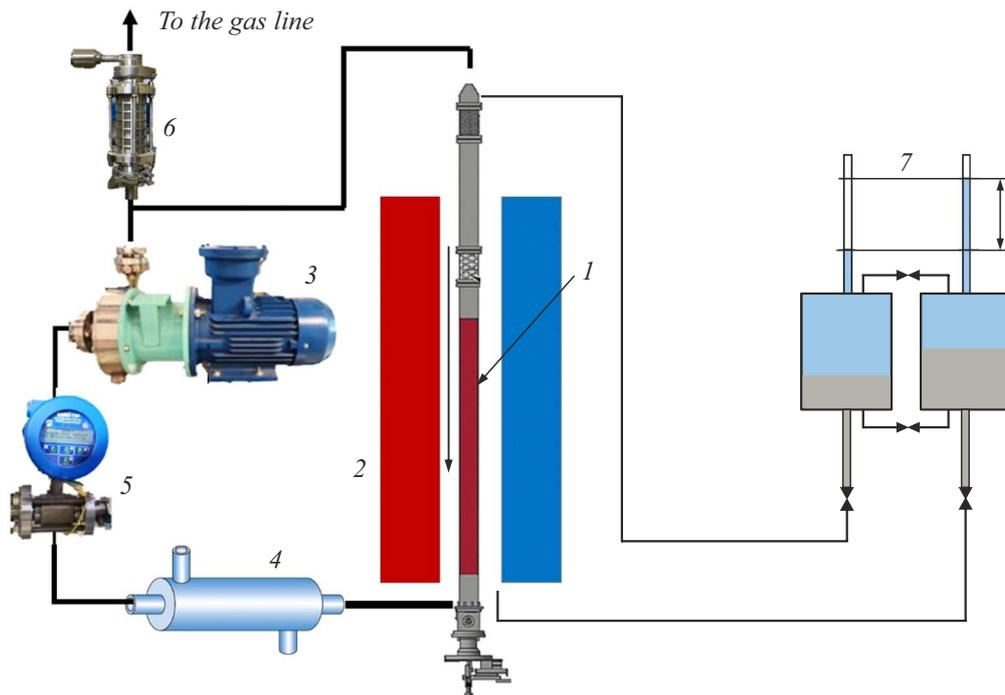


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — экспериментальный рабочий участок, 2 — электромагнит, 3 — насос, 4 — теплообменник, 5 — электромагнитный расходомер, 6 — гаситель пульсаций воздушного типа, 7 — измеритель перепада давления.

уровней по воде [m], d_1, d_2 — диаметры колб и шлангов соответственно [m].

Далее коэффициент гидравлического сопротивления вычислялся по формуле

$$\xi = \frac{2DdP}{\rho_{\text{Hg}}U^2L}, \quad (2)$$

где D — внутренний диаметр трубы [m], U — средняя скорость потока жидкого металла [m/s], L — расстояние между отборами давления [m].

Для исследования влияния электрической проводимости стенок канала на гидросопротивление было изготовлено четыре рабочих участка, представляющих собой круглые трубы с внутренним диаметром 40 мм: две из них с толщиной стенки 2.5 мм и две с толщиной стенки 10 мм. Длина каждого из участков составляла 750 мм. Для улучшения контакта ртуть–сталь на паре труб (тонкостенная и толстостенная) применялось омеднение внутренних поверхностей. Толщина наносимого медного покрытия $\sim 100 \mu\text{m}$. В исследованиях использовалась ртуть марки Р-1.

Магнитное поле воздействует на поток жидкого металла, подавляя турбулентность и делая поток ламинарным. Полученные экспериментальные данные и используемые асимптотики соответствуют ламинарному течению в сильном поперечном магнитном поле [4]. Известно, что для задачи гидравлического сопротивления проводящего канала коэффициент сопротивления зависит не от двух независимых параметров (числа

Рейнольдса и Гартмана), а только от их комбинации — числа Стюарта [4].

Результаты измерений показаны в виде зависимостей коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного параметра — числа Стюарта $N = \text{Ha}^2/\text{Re}$, где числа Рейнольдса (Re) и Гартмана (Ha) определяются как

$$\text{Re} = \frac{UD}{\nu}, \quad \text{Ha} = BD\sqrt{\frac{\sigma}{\eta}}, \quad (3)$$

где ν — кинематическая вязкость ртути [m^2/s], B — индукция магнитного поля [Т], σ — электропроводность ртути [Ω^{-1}], η — динамическая вязкость ртути [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

На первом этапе исследовались тонкостенные участки ($40 \times 2.5 \text{ mm}$) с омеднением и без омеднения (рис. 2, а). Экспериментальные точки для трубы с омеднением расположены выше значений для неомедненной трубы, что дает возможность утверждать, что контакт ртуть–сталь улучшается. Для сравнения на рисунке представлены также расчетные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления для каналов с идеально проводящими и полностью изолированными стенками [3]. Экспериментальные точки располагаются между этими кривыми и хорошо описываются зависимостью для стенок с конечной проводимостью [4]. Свойства нержавеющей стали 12Х18Н10Т взяты из работы [10], свойства ртути — из справочника [11]. Теоретическая зависимость для тонкостенной неомедненной трубы при значении относительной проводимости $C_w = 0.044$ хорошо описывает результаты эксперимента только в случае с омедненной стенкой. Результаты без омеднения

описываются зависимостью со сниженной в 2.6 раза проводимостью ($C_w = 0.017$). Это свидетельствует о плохом электрическом контакте ртути и стали из-за плохого смачивания ртутью стенок канала.

На втором этапе проводились измерения с парой толстостенных труб (40×10 mm), одна из которых была омеднена (рис. 2, b). Значения гидросопротивления в толстостенных трубах оказываются выше значений для тонкостенных труб. Омеднение существенно улучшает контакт жидкости со стенкой. Теоретическая зависимость хорошо описывает полученные результаты при рассчитанном значении $C_w = 0.176$ в случае омедненной трубы. Без омеднения зависимость хорошо описывает экспериментальные точки только при сниженной в 6.5 раза относительной проводимости стенки (C_w снижается до 0.027), что указывает на плохой контакт жидкости со стенкой трубы.

В рамках настоящей работы также проводились исследования потери смачиваемости омедненной стенки с течением времени (рис. 3). Для этого ртуть выдерживалась в омедненной трубе длительное время, в течение которого периодически проводились измерения

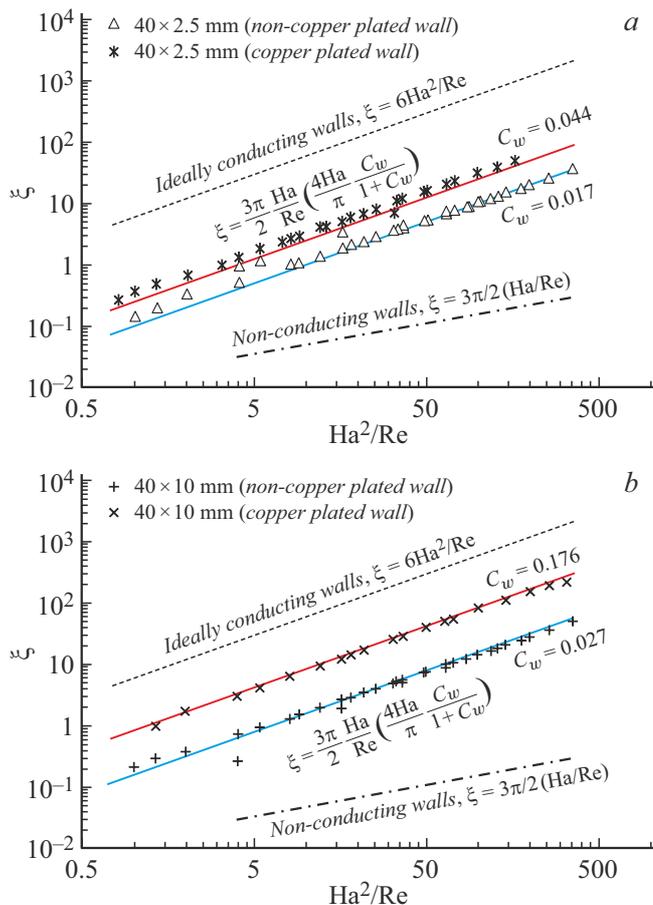


Рис. 2. Гидравлическое сопротивление при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле. *a* — тонкостенная круглая труба (40×2.5 mm), *b* — толстостенная круглая труба (40×10 mm). $Re = (10-40) \cdot 10^3$, $Ha = 0-1800$.

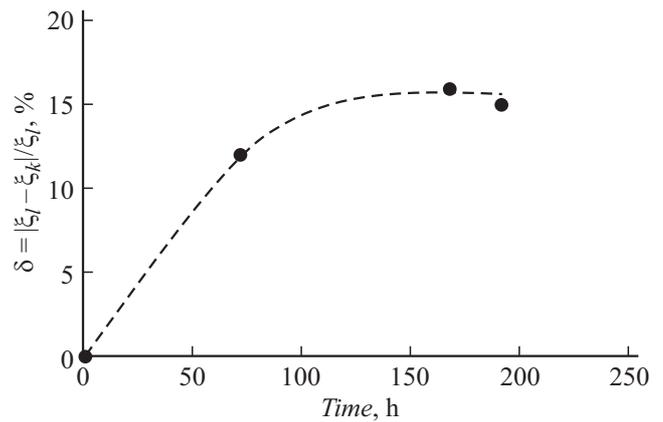


Рис. 3. Отклонение коэффициента гидросопротивления от данных первоначального измерения в зависимости от времени выдержки жидкого металла в контуре.

гидросопротивления. Результаты показали, что отклонение последующих замеров от первого выходит на постоянное значение и составляет $\sim 15\%$.

Таким образом, проведены экспериментальные измерения гидравлического сопротивления при течении жидкого металла в поперечном магнитном поле в круглых трубах с различной толщиной стенки для случаев с омеднением внутренней поверхности и без него. Эксперименты показали влияние толщины стенки и омеднения внутренней поверхности на контакт жидкость–стенка и на гидравлическое сопротивление. Полуэмпирические закономерности хорошо описывают полученные результаты в случае с омедненными трубами. Для случая с неомедненными стенками результаты занижены в 3–7 раз, и для корректного описания проводимости необходима экспериментально определяемая поправка к коэффициенту относительной проводимости. Полученные результаты дают возможность учесть эффект влияния плохой смачиваемости стенки на гидравлическое сопротивление жидкого металла в магнитном поле в уже выполненных и планируемых экспериментальных исследованиях.

Финансирование работы

Работа Н.А. Лучинкина выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FSWF-2023-0017 (соглашение № 075-03-2023-383 от 18.01.2023 г.) в сфере научной деятельности на 2023–2025 гг. Работа И.А. Беляева, Л.А. Федосеева, Е.М. Шенягина, Н.Е. Балабаева выполнена при поддержке государственного задания № 075-00270-24-00 от 27.12.2023 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Smolentsev, *Fusion Sci. Technol.*, **79** (3), 251 (2023).
DOI: 10.1080/15361055.2022.2116905
- [2] O. Zikanov, I. Belyaev, Y. Listratov, P. Frick, N. Razuvanov, V. Sviridov, *Appl. Mech. Rev.*, **73** (1), 010801 (2021).
DOI: 10.1115/1.4049833
- [3] S. Smolentsev, *Fluids*, **6** (3), 110 (2021).
DOI: 10.3390/fluids6030110
- [4] Л.Г. Генин, В.Г. Свиридов, *Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах* (МЭИ, М., 2001).
- [5] J.A. Shercliff, *J. Fluid Mech.*, **1** (6), 644 (1956).
DOI: 10.1017/S0022112056000421
- [6] В.А. Глухих, А.В. Тананаев, И.Р. Кириллов. *Магнитная гидродинамика в ядерной энергетике* (Энергоатомиздат, М., 1987).
- [7] T. Mizushima, S. Iuchi, T. Sasano, H. Tamura, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **1** (2-3), 139 (1960).
DOI: 10.1016/0017-9310(60)90017-X
- [8] Л.А. Суханов, *Электрические униполярные машины* (ВНИИЭМ, М., 1964).
- [9] P. Klaudy, *Elektrotechnik und Maschinenbau*, **78** (3), 128 (1961).
- [10] Е.А. Протасов, В.Н. Петровский, В.Д. Миронов, *ЖТФ*, **89** (2), 202 (2019).
DOI: 10.21883/JTF.2019.02.47070.148-18 [Е.А. Protasov, V.N. Petrovskii, V.D. Mironov, *Tech. Phys.*, **64** (2), 171 (2019).
DOI: 10.1134/S1063784219020166].
- [11] П.Л. Кириллов, М.И. Терентьева, Н.Б. Денискина, *Теплофизические свойства материалов ядерной техники* (ИздАТ, М., 2007).