

СТАЦИОНАРНОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

А. П. ХОЖАИНОВ

(Ленинград)

Известные экспериментальные исследования стационарных потоков жидкого металла в магнитогидродинамических (МГД) каналах прямоугольного сечения [1-4] выполнялись только при нескольких значениях числа Рейнольдса, что не позволило четко выявить основные закономерности течения в зоне перехода ламинарного режима в турбулентный. Кроме этого, изучение турбулентных магнитогидродинамических потоков ограничивалось рамками плоских каналов.

Ниже приводятся некоторые результаты экспериментальных исследований влияния поперечного магнитного поля на коэффициент сопротивления при тчении ртути в МГД канале с отношением сторон 1 : 2.5. Выбор канала с указанным отношением сторон был продиктован необходимостью проведения исследований промежуточного случая между течениями в плоском и квадратном каналах, существенно отличающихся между собой из-за различного влияния стенок, параллельных магнитному полю. При этом для каждого значения числа Гартмана исследования проводились при 30—50 значениях числа Рейнольдса.

Обозначения

B_0 — индукция приложенного магнитного поля;	γ — геометрический параметр канала;
M — число Гартмана;	λ° — составляющая коэффициента сопротивления в обычной гидродинамике, обусловленная пульсациями;
R — число Рейнольдса;	Ψ — нормированная функция;
λ_{tm} — коэффициент сопротивления турбулентного магнитогидродинамического потока;	σ — электропроводность металла;
λ_* — критическое значение коэффициента сопротивления;	η — вязкость металла;
	R_0 — гидравлический радиус;
	N — параметр магнитного поля;

Основные данные экспериментального МГД канала:

длина канала $l = 1\,000$ мм;
 высота канала $b = 7.8 \pm 0.05$ мм;
 ширина канала $a = 19 \pm 0.05$ мм;
 длина активной зоны канала $l_1 = 260$ мм;
 площадь полюса электромагнита $S = 292 \times 100$ мм²;
 воздушный зазор электромагнита $\delta = 35$ мм;
 пределы изменения магнитной индукции в зазоре $B_0 = (0 - 0.6)$ тесла.

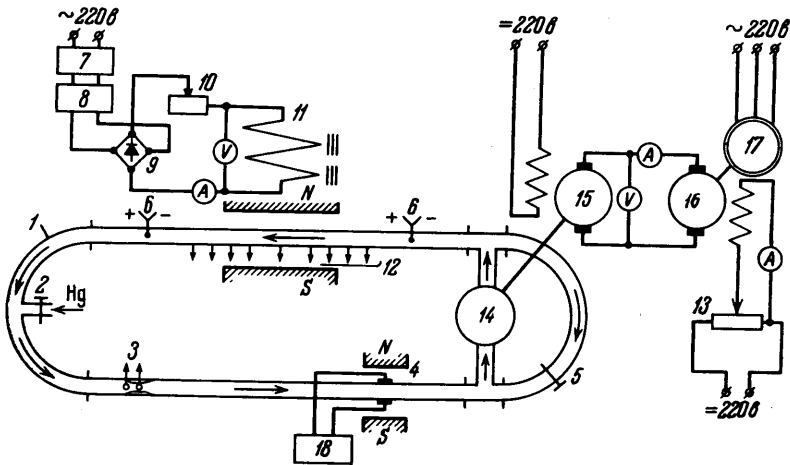
Экспериментальный канал был изготовлен из толстостенного оргстекла. Для оценки однородности структуры потока в активной зоне по длине канала было установлено девять штуцеров отбора статического давления.

МГД канал включался в замкнутую циркуляционную систему с дистиллированной ртутью. Ртуть приводилась в движение механическим насосом с электроприводом по системе генератор — двигатель, позволяющей плавно и в широких пределах изменять скорость течения металла в системе. Для получения минимальных скоростей течения ртути был предусмотрен специальный обходной «рукав» с дроссельной заслонкой.

Средняя скорость течения ртути в системе регистрировалась электромагнитным расходомером с прямоугольным каналом и сплошными электродами в комплекте с низкоомным потенциометром постоянного тока ППТН-1. Для дублирования в системе была установлена трубка Вентури.

Давление в канале измерялось двухжидкостными манометрами ртуть—дистиллированная вода.

Для исключения случайных погрешностей на счет возможных колебаний напряжения сети обмотка возбуждения электромагнита получала питание через стабилизатор напряжения СТН-5 и лабораторный автотрансформатор ЛАТР с германиевыми выпрямителями на выходе.



Фиг. 1. Принципиальная схема экспериментальной магнитогиродинамической установки:

1 — циркуляционный контур, 2 — впускной клапан, 3 — трубка Вентури, 4 — электромагнитный расходомер, 5 — дроссельная заслонка, 6 — термометры, 7 — стабилизатор напряжения, 8 — ЛАТР, 9 — германиевые выпрямители, 10 — регулировочное сопротивление, 11 — обмотка возбуждения электромагнита, 12 — штуцера отбора статического давления, 13 — потенциометр регулирования скорости, 14 — механический насос, 15 — двигатель постоянного тока, 17 — генератор, 18 — асинхронный двигатель; А и V — амперметр и вольтметр

Схема экспериментальной установки приведена на фиг. 1.

Экспериментальные исследования проводились при значениях числа Гартмана $M = 0,675, 14,3, 20,5, 27,2, 40,0, 61,0$ в диапазоне изменения чисел Рейнольдса R от 1600 до 32000 (нижнее значение числа R ограничивалось пределами чувствительности манометров).

Результаты экспериментальных исследований в виде зависимостей $\lg(100\lambda_{tm})$ от $\lg R$ приведены на фиг. 2. Здесь же приведены опытные данные Никурадзе [5], полученные при течениях воды в аналогичном канале, соответствующие в нашем случае отсутствию магнитного поля. В области перехода ламинарного режима течения в турбулентный данные Никурадзе дополнены опытными данными Шиллера [6], полученными на канале прямоугольного сечения с отношением сторон 1 : 2,8.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что переход ламинарного режима течения в турбулентный в рассматриваемом случае наблюдается при $\lambda_* \approx 0,0177 = \text{const}$, что находится в согласии с ранее сделанными выводами [7].

При малых и умеренных числах Гартмана существует обширная область, в которой при заданном числе Рейнольдса величина коэффициента сопротивления потока заметно меньше, чем в обычной гидродинамике, что свидетельствует о преобладающем в этой области влиянии эффекта гашения пульсации над эффектом деформации профиля скорости.

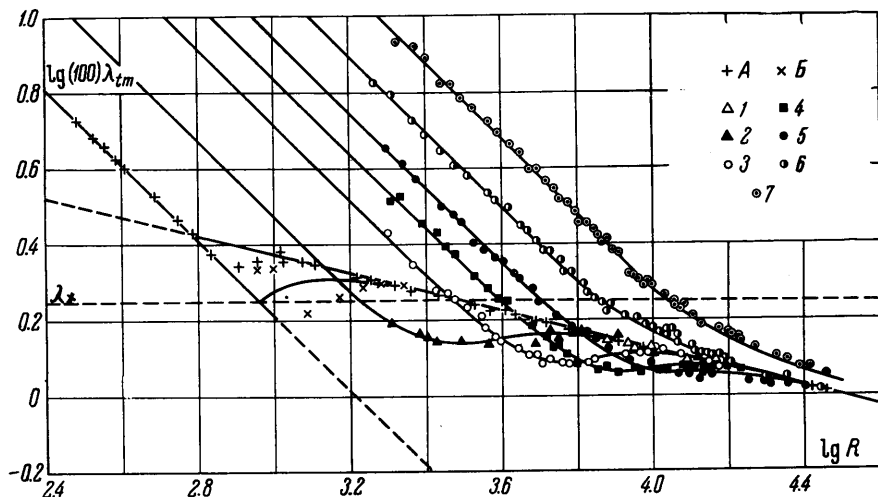


Рис. 2. Закон сопротивления для гладкого магнитогидродинамического канала прямоугольного сечения. Опытные данные: А — Никурадзе; В — Шиллер. Опыты автора: 1 — $M=0$, 2 — $M=6.75$, 3 — $M=14.3$, 4 — $M=20.5$, 5 — $M=27.2$, 6 — $M=40.0$, 7 — $M=61.0$

Приведенное семейство кривых описывается формулой [7]

$$\lambda_{tm} = \frac{k(\gamma, M)}{R} + \lambda^0 \left[1 - \Psi \left(R, \frac{M^2}{R}, \gamma \right) \right] \quad (1)$$

Здесь при значении $\gamma = \pi b / 2a = 0.645$

$$\lambda^0 = 0.133 \left\{ \frac{1}{R^{0.25}} - \left[\frac{16}{\lambda^*} + 0.0083 \left(R - \frac{16}{\lambda^*} \right) \right]^{-1} \right\}$$

В соответствии с решением Шерклифа [8], полученным для ламинарного режима течения жидкости, параметр $k(\gamma, M)$ может быть представлен в виде

$$k(\gamma, M) = 2.06 \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4} \left(1 - \frac{N(\operatorname{ch} N - \operatorname{ch} 0.705 M)}{0.83(2n-1)^2 \operatorname{sh} N} \right) \right]^{-1} \quad (2)$$

При $M \gg 1$ можно принять

$$k(\gamma, M) \approx 2.83 M \left(1 - \frac{0.415}{\sqrt{M}} - \frac{1.42}{M} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$N^2 = 0.496 M^2 + 1.66 (2n-1)^2, \quad M = R_0 B_0 \sqrt{\sigma / \eta}$$

$$R_0 = ab / (a + b)$$

Нормированная функция Ψ , свойства которой изложены в [7], представляется следующим выражением:

$$\Psi\left(R, \frac{M^2}{R}, \gamma\right) = \frac{M^2}{R} \left(1 + \alpha \frac{M^2}{R}\right) \left[\beta_0 + \beta_1 \frac{M^2}{R} + \alpha \left(\frac{M^2}{R}\right)^2\right]^{-1} \quad (4)$$

Путем обработки опытных данных в рассматриваемом случае получено

$$\alpha = \frac{4 \cdot 10^9}{R^{2.2}}, \quad \beta_0 = 0.1 \operatorname{th}(4.7 \cdot 10^{-5} R), \quad \beta_1 = 1.25 - 0.6 e^{-8.55 \cdot 10^{-5} R}$$

Отметим, что зависимость (4) справедлива при ламинарном и турбулентном режимах течения жидкого металла в МГД каналах и допускает непрерывный переход в обычную гидродинамику.

Поступило 16 X 1964

ЛИТЕРАТУРА

1. Hartmann I., Lazarus F. Experimental investigations on the flow of mercury in a homogeneous magnetic field. Det. Kgl. Dansk. Vidensk. Selsk., Mat.-fys. Medd., 1937, vol. 15, No. 7.
2. Murgatroyd W. Experiments on magneto-hydrodynamic channel flow. Philos. Mag., 1953, vol. 44, No. 359.
3. Браувер Г. Г., Лиелаясис О. А. Об особенностях влияния поперечного магнитного поля на турбулентные течения жидкого металла при различных числах Рейнольдса. Вопросы магнитной гидродинамики, Изд-во АН Латв. ССР, 1963, т. III.
4. Bronillette E., Lykoudis P. Measurements of skin friction for turbulent magnetofluidmechanic channel flow. Purdue Univ. Agr. Exp. Stat. Indiana, 1962, p. 10.
5. Nikuradse I. Turbulente Strömung in nicht kreisförmigen Röhren. Ingr-Arch., 1930, vol. 1.
6. Schiller L. Über den Strömungswidstand von Röhren. Z. angew. Math. und Mech., 1923, 3.
7. Рябинин А. Г., Хажанов А. И. Турбулентное течение электропроводящей жидкости в трубах прямоугольного сечения под действием электродинамических ponderomotorных сил. Ж. техн. физ., 1963, т. 33, № 1.
8. Shercliff I. A. Steady motion of conducting fluids in pipes under transverse magnetic fields. Proc. Cambridge Philos. Soc., 1953, vol. 49.