

О ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СОПРОТИВЛЕНИИ ШЕРОХОВАТЫХ
КАНАЛОВ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕСЖИМАЕМОЙ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ
ЖИДКОСТИ В ПРИСУТСТВИИ ПОСТОЯННОГО ПОПЕРЕЧНОГО
МАГНИТНОГО ПОЛЯ

А. В. ТАНАНАЕВ, Ю. П. ЧЕРНЯЕВ

(Ленинград)

В работе обсуждаются новые результаты исследования гидравлического сопротивления каналов с искусственной шероховатостью стенок. На основании экспериментальных данных делается вывод о несущественной роли сил инерции по сравнению с другими силами при ламинаризованном режиме течения. Выявлена аналогия между обтеканием элементов шероховатости гартмановским потоком с обтеканием тел свободным МГД потоком для случаев, когда высота элементов шероховатости много больше толщины градиентного слоя $\langle k \rangle \gg H^{-1}$. Это открывает дополнительные возможности изучения МГД обтекания тел при больших числах Рейнольдса и Гартмана. Приводятся зависимости для определения коэффициента сопротивления. Показано, что в турбулентной зоне течения экспериментальные данные о коэффициенте сопротивления для большинства шероховатых каналов удовлетворительно обобщаются в виде линейной зависимости от числа Стюарта.

Из всего многообразия магнитогидродинамических течений наиболее подробно исследовано течение в электроизолированных гладких трубах в присутствии постоянного поперечного магнитного поля [1, 2]. Значительно меньше работ посвящено изучению течений в трубах с шероховатыми стенками.

Данная работа посвящена исследованию гидравлического сопротивления каналов, стенки которых покрыты шероховатостью, полученной при торцовом и цилиндрическом фрезеровании, строгании и шлифовании.

Этому исследованию предшествовала серия специальных экспериментов с целью количественной оценки влияния на гидравлическое сопротивление М-образной структуры течения, обусловленной неравномерным полем на входе в канал [2]. Было показано, что эффекты, обусловленные конечными размерами исследуемого канала и области, занятой магнитным полем, не оказывают заметного влияния (в пределах $\pm 2\%$) на продольный перепад давления $\partial p / \partial x = dp / dx$, если он измеряется на участке, на котором вдоль длинных сторон сечения, перпендикулярных вектору магнитной индукции, давление распределено равномерно, т. е. $\partial p / \partial z = 0$.

1. Исследования были выполнены на ртутном стенде, описание которого дано в [1, 2]. Основные характеристики 11 исследованных каналов приведены в табл. 1.

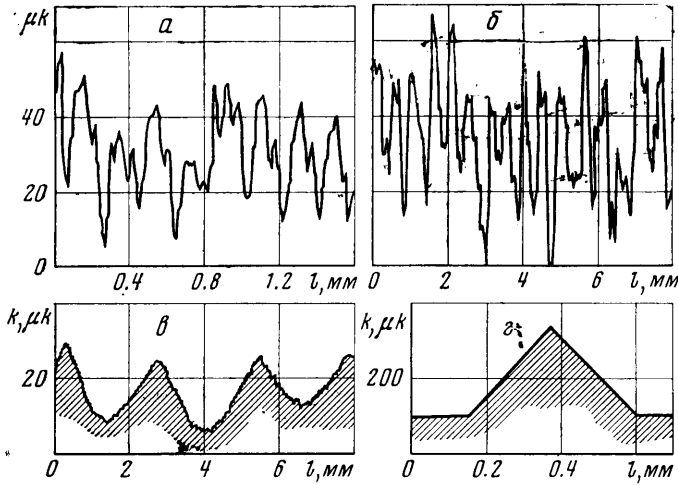
Канал 1, 2 и 5–10 были изготовлены из органического стекла. В каналах 3, 4 и 11 стенки, перпендикулярные магнитному полю, были сделаны из обычной магнитной стали (Ст. 3), на внутреннюю поверхность которых был наклеен слой пластмассы толщиной 3 мм. Шероховатость создавалась только на стенках канала, перпендикулярных магнитному полю, $y = \pm a$. Стенки, параллельные магнитному полю $z = \pm b$, у всех каналов были гладкими и выполнены из органического стекла.

Отбор статических давлений по длине канала производился через отверстия диаметром 0,6 мм, которые располагались по средним линиям длинной и короткой сторон сечения с шагом 50 мм. При этом для измерения давлений вдоль шероховатой стенки были устроены специальные гладкие площадки размером 8×20 мм².

Размеры поперечного сечения каналов определялись путем объемной тарировки с точностью не менее 2,5%. Среднее значение максимальной высоты $\langle k \rangle$ элементов шероховатости (табл. 1) определялось по профилограммам поверхности, снятым в нескольких местах каждой стенки (фиг. 1). На фиг. 1 приведены примеры профилограмм поверхностей исследованных каналов: *a* – торцовое фрезерование, каналы 7 и 8; *b* – строгание, каналы 3 и 4; *в* – цилиндрическое фрезерование, каналы 9 и 10; *г* – поперечные полосы (строгание), каналы 1, 2, 5 и 6.

Поперечное магнитное поле создавалось электромагнитом с длиной полюсных наконечников 600 мм для каналов 3 и 4 и 500 мм для остальных каналов. Неравномерность поля по ширине канала ($z=\pm b$) составляла не более 2%. Магнитная индукция по длине канала в пределах мерных участков оставалась постоянной. Точность измерения индукции не менее 1.5%.

Участок с постоянным градиентом давления $dp/dx=\text{const}$ для определения коэффициента сопротивления находился по измерениям пьезометрических линий. Этот участок для каналов 1, 2 и 5-11 не менее 200 мм, а для каналов 3 и 4 не менее 300 мм.



Фиг. 1

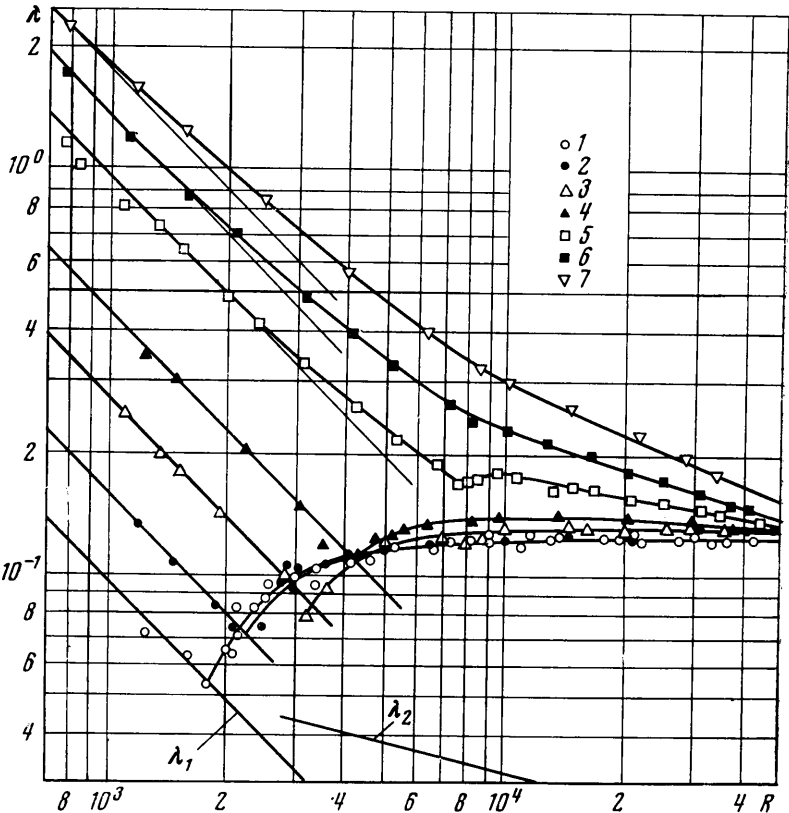
При вычислении коэффициентов сопротивления $\lambda=(2gD\Delta h)/L\langle U \rangle^2$ и чисел $R=\langle U \rangle D/\nu$ и $H=BD/(\sigma/\rho\nu)^{1/2}$ за характерную скорость принята среднерасходная $\langle U \rangle$, а за характерный размер — гидравлический диаметр $D=2ab/(a+b)$; B — магнитная индукция, σ — проводимость ртути, ρ — плотность, ν — кинематический коэффициент вязкости.

2. Наиболее типичные опытные данные показаны на фиг. 2 и 3 в виде семейства кривых $\lambda=\lambda(R)$ при $H=\text{const}$. Опытные данные фиг. 2 относятся к каналу 1 с шероховатостью в виде поперечных полос (табл. 1); точ-

Таблица 1

Вид шероховатости	№ канала	a, мм	b/a	$\langle k \rangle/a$	Диапазон исследования	
					$R \cdot 10^{-3}$	H_{max}
Поперечные полосы	1	2.05	35.5	0.230	0.8—50	100
	2	8.50	8.8	0.055	6—500	380
	3	2.02	56.7	0.038	1—80	190
	4	7.65	15.7	0.010	10—500	450
Продольные полосы	5	2.50	30.3	0.188	1.5—100	100
	6	9.00	8.3	0.052	9—500	380
Торцовое фрезерование	7	1.95	39.5	0.046	1.2—70	100
	8	8.57	8.9	0.010	10—650	300
Цилиндрическое фрезерование	9	2.48	31.1	0.032	1.3—100	120
	10	9.15	8.2	0.098	10—500	390
Шлифование	11	1.40	43.5	0.001	2—60	120

ки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют значениям $H=0, 9.8, 19.8, 30.3, 60.3, 79.5, 100$. Сплошные линии: $\lambda_1=96/R$, $\lambda_2=0.316/R^{0.25}$. На фиг. 3 показаны опытные данные для канала 5 с шероховатостью в виде продольных полос (табл. 1); точки 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют значениям $H=0, 9.1, 19.7, 34.6, 50.7, 76, 102$. В области ламинарного МГД течения экспериментальные данные $\lambda=\lambda(R, H)$ даже для каналов с очень большой шероховатостью, как и для течения в гладких каналах, располагаются на пря-



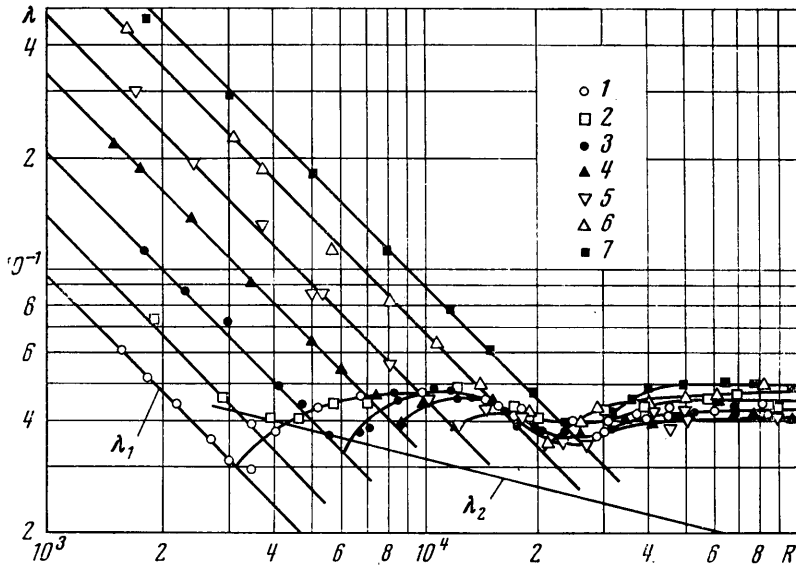
Фиг. 2

мым, параллельных (в логарифмических координатах) линии Пуазейлева течения $\lambda=\lambda(R)$ при $H=0$. Отсюда следует, что для определенных соотношений чисел Рейнольдса и Гартмана силы инерции, возникающие при обтекании элементов шероховатости, видимо, несущественны. Этот вывод можно рассматривать как некоторое экспериментальное подтверждение справедливости «стоксова приближения» [3] в теории ламинарного МГД обтекания таких тел, как шар, цилиндр и др.

Остановимся на этом несколько подробнее. Представим коэффициент сопротивления шероховатого канала в виде суммы сопротивления λ_r , соответствующего течению в гладком канале, и некоторого добавочного сопротивления λ_s , обусловленного шероховатостью стенок. В соответствии с асимптотическим решением Гартмана при $H \gg 1$ можно принять, что $\lambda_r = A8H/R$. В общем случае $A \approx 1$ и зависит от параметров шероховатости.

Коэффициент λ_s зависит как от формы и размеров элементов шероховатости, так и от ориентации их к направлению течения и магнитного поля. Для оценки его величины рассмотрим два характерных канала с

шероховатостью в виде поперечных и продольных (к направлению течения) полос. Если теперь для простоты представить, что указанные полосы являются полуцилиндрами, то напрашивается следующая аналогия. Известно [3], что в присутствии магнитного поля, направленного нормально к оси цилиндра, в случае поперечного обтекания коэффициент сопротивления при $H \gg 1$ $C_D \approx H^2/R$, а в случае продольного обтекания $C_D \approx H/R$. Логично предположить, что величина добавочного сопротивле-



Фиг. 3

ния для шероховатости в виде поперечных и продольных полос может быть представлена, соответственно, как

$$(1) \quad \lambda_k = C^7 / 8\pi H_1^2 / R_1, \quad \lambda_k = C_1 \pi H_1 / R_1$$

где C и C_1 — коэффициенты, зависящие от формы полос и густоты их размещения по поверхности стенки, H_1 и R_1 — числа Гартмана и Рейнольдса, построенные по характерному размеру $\langle k \rangle$ элементов шероховатости и средней скорости течения $\langle U \rangle$.

Принимая во внимание (1) для каналов с поперечными и продольными полосами, получаем соответственно

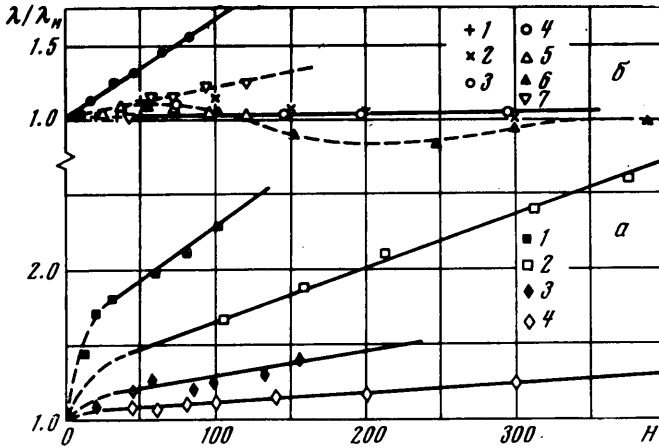
$$(2) \quad \lambda/\lambda_H = A + B(\langle k \rangle/a)H, \quad \lambda/\lambda_H = A_1 + B_1$$

Здесь $\lambda_H = 8H/R$ соответствует асимптотическому решению Гартмана, а новые постоянные B и B_1 отличаются от C и C_1 на некоторые численные множители, появляющиеся при алгебраических преобразованиях и при замене характерного размера $\langle k \rangle$ на полувысоту канала a .

Из (2) видно, что для каналов, у которых шероховатость образована поперечными полосами, отношение коэффициентов сопротивления шероховатого и гладкого каналов λ/λ_H линейно зависит от относительной высоты элементов шероховатости $\langle k \rangle/a$ и от числа H . В случае же каналов с продольными полосами отношение λ/λ_H не зависит от числа Гартмана. Полученный вывод очень хорошо подтверждается опытными данными (фиг. 4). На фиг. 4 показаны зависимости $\lambda/\lambda_H = f(H)$: a — шероховатость — поперечные полосы. Точки 1, 2, 3, 4 соответствуют относительной шероховатости $\langle k \rangle/a = 0.230, 0.052, 0.038, 0.010$; b — другие виды шероховатости; точки

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 соответствуют каналам 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Хорошо видно, что для шероховатости в виде поперечных полос при числах $H > 10$ отношение λ/λ_H линейно зависит от числа H .

Коэффициенты A и B в (2), как показывают опытные данные, зависят как от относительного размера выступов шероховатости, так и от их формы. Можно ожидать, что зависимость $\lambda = f(\langle k \rangle/a)$ будет тем ближе к линейной, чем больше относительная высота шероховатости. Другими словами, аналогия обтекания шероховатости гартмановским потоком с малой толщиной



Фиг. 4

пристенного градиентного слоя (порядка H^{-1}) будет тем теснее к обтеканию тел свободным потоком, чем относительно крупнее элементы шероховатости. С уменьшением величины $\langle k \rangle/a$ влияние шероховатости на сопротивление снижается.

Высказанные соображения качественно хорошо подтверждаются опытными данными (фиг. 4). Для шероховатости в виде поперечных полос получаем обобщение опытных данных в виде зависимости $\langle k \rangle$

$$(3) \quad \lambda/\lambda_H \approx 1 + (\langle k \rangle/a) (1 + 0.02H), \quad \langle k \rangle/a \gg H^{-1}, \quad k/a > 1/30$$

$$(4) \quad \lambda/\lambda_H \approx 1 + 0.001 (\langle k \rangle/a)^{0.3} H, \quad \langle k \rangle/a \sim H^{-1}, \quad \langle k \rangle/a < 1/30$$

Из сопоставления (3) и (4) видно, что во втором случае влияние параметра $\langle k \rangle/a$ на сопротивление существенно снижается.

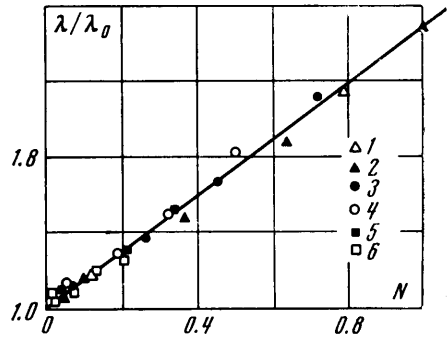
Для шероховатости в виде продольных полос отношение λ/λ_H близко к единице (фиг. 4), следовательно, в (2) константа $B_1 \approx 0$. Сопротивление таких каналов практически не отличается от сопротивления гладкого канала, если при определении гидравлического диаметра смоченный периметр определять с учетом поверхности элементов шероховатости. Отклонение λ/λ_H от единицы на фиг. 4, б объясняется наличием небольшой шероховатости на самих продольных полосах.

Следует заметить, что сопротивление труб с так называемой «волнистой» шероховатостью (в данной работе к ней приближается поверхность после цилиндрического фрезерования) и в присутствии магнитного поля ведет себя аномально. Из фиг. 4, б видно, что при некоторых числах H наблюдается снижение сопротивления такого канала по сравнению с гладким каналом.

В МГД течениях характеристика поверхности посредством «эквивалентной» (по сопротивлению) шероховатости утрачивает то значение, которое

она имеет в обычной гидродинамике, так как гидравлическое сопротивление при ламинарном движении в шероховатых трубах существенно зависит как от ориентации элементов шероховатости по отношению к направлениям магнитного поля и течения, так и от соотношения между толщиной гартмановского слоя и абсолютной высотой бугорков шероховатости. Это подтверждается данными фиг. 4, из которых видно, что эквивалентная песочная шероховатость, большая для торцового фрезерования соответствует меньшему увеличению сопротивления, чем для поперечного строгания.

Однако замеченная аналогия между обтеканием элементов шероховатости гартмановским потоком в канале и МГД обтеканием тел свободным потоком позволяет сравнительно легко путем постановки соответствующих экспериментов предсказывать структуру асимптотических законов сопротивления при обтекании тел сложной формы, для которых трудно получить теоретические решения.



Фиг. 5

Таблица 2

Вид шероховатости	№ канала	$\langle h \rangle/a$	γ	$\left(\frac{D}{2k}\right)_0$	Пределы применимости	
					$R \cdot 10^{-3}$	H_{\max}
Поперечные полосы	1	0.230	1.50	1.8	10—50	100
	2	0.055	0.95	5.8	20—500	380
	3	0.038	1.70	30	10—80	120
	4	0.010	1.85	250	50—500	450
Торцовое фрезерование	7	0.046	3.20	15.5	10—70	100
	8	0.010	1.55	120	50—650	300

При турбулентном движении в шероховатых трубах уже не удастся провести такую близкую аналогию с обтеканием тел. Однако для шероховатостей, приближающихся к поперечным полосам, экспериментальные данные по коэффициентам сопротивления удовлетворительно обобщаются линейной зависимостью от числа Стюарта $N = H^2/R$, $\lambda = \lambda_0(1 + \gamma N)$, где λ_0 — коэффициент сопротивления канала в отсутствие магнитного поля, γ — коэффициент пропорциональности, зависящий от размера, формы и относительного расположения элементов шероховатости, значения которого приведены в табл. 2. Как и следовало ожидать, наибольшие коэффициенты γ соответствуют шероховатостям в виде поперечных полос. В качестве примера на фиг. 5 приведены данные по каналу 1 (табл. 1); точки 1, 2, 3, 4, 5, 6 соответствуют числам $R = (0.8, 1, 1.4, 2.3, 5) \cdot 10^4$.

Поступила 28 XII 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Тананаев А. В. Гидравлика магнитогидродинамических машин. М., Атомиздат, 1970.
2. Боченинский В. П., Брановер Г. Г., Тананаев А. В., Черняев Ю. П. Экспериментальное исследование сопротивления течению электропроводящей жидкости в плоских изолированных каналах в присутствии поперечного магнитного поля с учетом концевых эффектов и шероховатости стенок. Изв. АН СССР, МЖТ, 1974, № 4.
3. Цинобер А. Б. Магнитогидродинамическое обтекание тел. Рига, «Зинатне», 1970.