

Академик М. Д. МИЛЛИОНЩИКОВ,
член-корреспондент АН СССР В. И. СУББОТИН, М. Х. ИБРАГИМОВ,
Г. С. ТАРАНОВ, Л. Л. КОБЗАРЬ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ТРУБАХ С ИСКУССТВЕННОЙ
ШЕРОХОВАТОСТЬЮ СТЕНОК**

Экспериментальное и теоретическое изучение движения жидкости и газа в каналах с шероховатыми стенками значительно отстает от анализа течений вдоль гладких стенок и не удовлетворяет возникающим запросам техники.

Геометрическое разнообразие встречающихся в практике шероховатых поверхностей усложняет рассматриваемую проблему, так как с точки зрения теории подобия необходимо, чтобы при гидравлическом проявлении

№ п/п	№№ n/p	Вид нарезки	1		2		3		4			5			
			h	S	h	S	h	S	h	S	h	S	h	S	
1	0,12	246	1-1	S=0,25											
2	0,24	123	1-2	S=0,5											
3	0,5	59	1-3	S=1				4-3	435	43A	5-37	532	533		
					S	1	2	2	S	30	30	30			
					n	80	40	40	8	29	20	10			
4	1	23,5	1-4	S=2											
5	2	14,8	1-5	S=4	2-5	S=4	3-5	S=4	4-5-1	4-5-2					
									S	4	4				
									n	20	44				

Рис. 1. Таблица вариантов шероховатых труб. n — число заходов перекрестной резьбы

шероховатости геометрическое подобие распространялось также и на элементы шероховатости стенок, т. е. на их высоту, форму и распределение по поверхности.

Тщательное подробное экспериментальное изучение течения жидкости в каналах с песочной шероховатостью стенок проведено Никурадзе (1). Теоретическое решение гидродинамической задачи для данного и аналогичного типов шероховатостей на основе применения принципа суперпозиции при получении коэффициента вязкости дано в работе (2).

Песочная шероховатость представляет собой лишь один из видов шероховатостей. Исследования, проведенные Шлихтингом (3), Нуннером (4) и др., показали, что гидродинамическое проявление шероховатых поверхностей не может быть охарактеризовано только относительной высотой элементов шероховатости, как это следовало из закономерностей, полученных

Никурадзе. Обнаружено влияние формы элементов шероховатости и их взаимного расположения.

Имеющегося экспериментального материала недостаточно для понимания механизма воздействия шероховатости на поток и получения расчетных зависимостей, отражающих связь коэффициентов сопротивления и полей скорости с геометрическими характеристиками шероховатой поверхности. Это вызвало необходимость проведения исследования течения в каналах с шероховатыми стенками, для которых хорошо известны форма, размеры, плотность распределения по поверхности, и взаимное расположение элементов шероховатости.

В данной работе проводилось исследование турбулентного течения в круглых трубах с правильной, искусственно созданной шероховатостью стенок. Шероховатость создавалась путем нарезания на внутренней по-

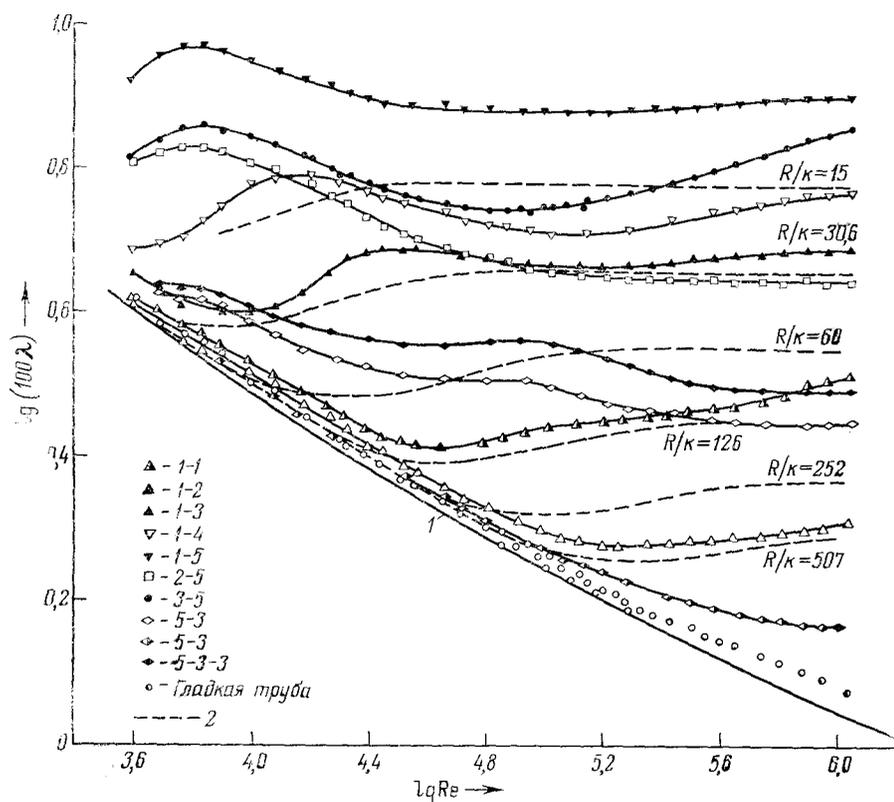


Рис. 2. Коэффициент сопротивления для труб с однозаходной резьбой и кольцевыми нарезками. 1 — гладкая труба (6), 2 — шероховатые трубы (1)

верхности дюралюминиевых труб однозаходных и многозаходных перекрестных резьб и кольцевых выточек. Варианты труб, используемых в экспериментах, приведены на рис. 1.

Однозаходные резьбы (изготовлено 7 вариантов, отличающихся высотой, шагом или формой нарезок) создавались специальными метчиками. Точность нарезок на трубах обеспечивалась принятой технологией их изготовления: обработка внутреннего диаметра труб и изготовление режущих элементов метчиков проводились по второму классу точности. Максимальный технологический допуск на высоту нарезок 0,03 мм. Многозаходные перекрестные резьбы на внутренней поверхности труб изготавливались поочередно — вначале резцом делались правые заходы резьбы, потом левые. Кольцевые выточки вариантов 5-3-1, 5-3-2, 5-3-3 в трубах делались с помощью резцов. Многозаходной перекрестной резьбой было создано

5 вариантов шероховатостей, отличающихся высотой выступов (пирамидок), формой основания и шагом их взаимного расположения.

Для исследования влияния дисперсии высот элементов шероховатости на гидродинамические характеристики потока изготовлены варианты 4-3-Б и 4-3-Д. Элементы шероховатости этих вариантов образованы нарезанием перекрестной 40-заходной резьбы с длиной хода 80 мм. Элементы шероховатости варианта 4-3-Б представляют собой усеченную пирамидку высотой 0,5 мм. Элементы варианта 4-3-Д имеют одинаковые с элемента-

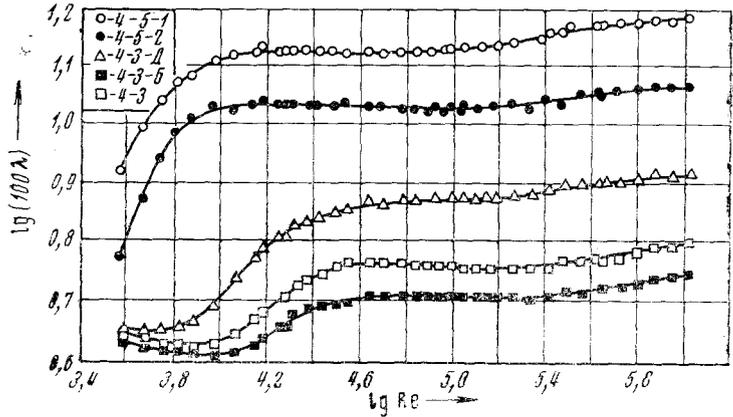


Рис. 3. Коэффициент сопротивления для труб с многозаходной перекрестной резьбой

ми варианта 4-3-Б основания пирамидок. Однако высоты пирамидок изменяются от 0 до 1 мм при средней арифметической высоте 0,5 мм. Количество пирамидок каждой высоты (число размеров высот равно девяти) найдено из условия, что гистограмма их распределения сглаживается кривой нормального закона с дисперсией $\sigma_k = 0,23$ мм.

Эксперименты проводились на воздухе (числа $Re = 5000 - 200\,000$) и на воде ($Re = 70\,000 - 1 \cdot 10^6$). Перепад давления определялся при гидродинамически стабилизированном течении в шероховатой трубе. Измерение малых перепадов давления в области низких чисел Рейнольдса осуществлялось специально изготовленным колокольным весовым микроманометром. Микроманометр обеспечивал измерение разности давлений 0,05 мм водяного столба с погрешностью менее 1%. Отбор давления в шероховатых трубах производился зондами статического давления. Сопротивление, создаваемое потоку зондами, определялось на основании их тарировки в гладкой трубе.

Результаты экспериментального исследования представлены на рис. 2 и 3. Расчет коэффициента гидравлического сопротивления λ производился по среднему гидравлическому диаметру $2R$, определяемому объемным способом.

Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для исследованных типов шероховатых поверхностей отличается от зависимостей, полученных как для несочной шероховатости ⁽¹⁾, так и для технических шероховатых труб ⁽²⁾. Обнаружено более раннее гидравлическое проявление шероховатости. В большинстве случаев этот эффект сказывается при $u_* k / \nu < 3$, где u_* — динамическая скорость, k — высота элементов шероховатости, ν — вязкость жидкости. В диапазоне чисел Рейнольдса до 10^6 практически не наблюдается интервала, где бы имел место квадратичный закон сопротивления, при котором λ для одного и того же типа нарезок определялось только относительной высотой выступов шероховатости.

Опыты Никурадзе дают четкое расслоение кривых λ по параметру R/k . Подобное расслоение для исследованных видов шероховатых поверхностей

пмеется только для геометрически подобных элементов шероховатостей. При изменении формы и шага выступов коэффициент сопротивления, независимо от сохранения величины R/k , значительно изменяется. Так, при $R/k = 15$ коэффициент λ (при $Re = 100\,000$) принимает значения от 0,045 до 0,135, в то время как в ⁽¹⁾ он равен $\approx 0,06$. Таким образом, средняя относительная высота элементов шероховатости является далеко не полной характеристикой шероховатой поверхности. Значительное влияние на коэффициент сопротивления оказывают шаг взаимного расположения элементов шероховатости и их форма.

Дисперсия высот элементов шероховатости вызывает значительное увеличение коэффициента сопротивления (при $Re = 10^5$ λ варианта 4-З-Д более чем в 1,6 раза превышает λ варианта 4-З-Б, рис. 3), что подтверждает соображения, высказанные в работах ^(2, 6).

Полученные экспериментальные данные для 15 вариантов каналов показывают достаточно сложный характер течения вдоль шероховатых стенок. Для выяснения механизма взаимодействия турбулентного потока с элементами шероховатости, получения обобщающих зависимостей и создания расчетных методик ведутся дальнейшие исследования.

Поступило
30 VIII 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ J. Nikuradse, VDI-Forschungsheft, № 361 (1932). ² М. Д. Миллионщикова, Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах, М., 1969. ³ H. Schlichting, Ing. Arch., 7, 1 (1936). ⁴ W. Nunner, VDI-Forschungsheft, № 455 (1956). ⁵ А. Д. Альтшуль, Гидравлические потери в трубопроводах, М., 1963. ⁶ М. Д. Миллионщикова, Атомная энергия, 28, 3 (1970).