

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГЛАДКИХ И ШЕРОХОВАТЫХ ТРУБ СО ВСТАВЛЕННОЙ СКРУЧЕННОЙ ЛЕНТОЙ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследования гидродинамики однофазных потоков в гладких и шероховатых трубах со вставленной скрученной лентой. Получены расчетные и графические зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от режимных и конструктивных параметров.

1. ВВЕДЕНИЕ

Искусственная шероховатость поверхности создается путем накатки, нарезки, штамповки, навивки проволоки и другими методами. Интенсификация теплообмена посредством шероховатости в общем случае происходит за счет более раннего перехода от ламинарного течения к турбулентному по сравнению с гладкой стенкой, турбулизации пристенного слоя жидкости и увеличения поверхности теплообмена относительно гладкой [1-4]. Турбулентные возмущения потока, генерируемые шероховатостью, одновременно с улучшением теплообмена повышают гидросопротивление. Определяющее влияние на теплообмен и трение оказывают соотношение высоты шероховатости и толщины вязкого подслоя, форма выступов и др. Шероховатость поверхности может быть сплошной или дискретная. Анализ показывает, что при однофазных течениях дискретная шероховатость позволяет интенсифицировать теплообмен при меньших потерях давления, чем в случае сплошной шероховатости стенок. Поэтому дискретная шероховатость в качестве способа интенсификации теплообмена при разработке высокоэффективного теплообменного оборудования часто более предпочтительна. Однако сплошная шероховатость наружной и внутренней поверхностей трубы может быть эффективна для повышения теплообмена при кипении [1]. В настоящее время остаются мало исследованными вопросы совместного влияния закрутки потока и шероховатости стенок канала на теплогидравлические характеристики. В связи с этим исследование гидродинамики и теплообмена при течении одно- и двухфазных сред в трубах с закруткой потока и сплошной шероховатостью стенки представляет значительный интерес.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Гидравлическое сопротивление относительно длинных гладких труб со вставленной скрученной лентой

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований в следующих

диапазонах режимных и конструктивных параметров: число Рейнольдса, подсчитанное по эквивалентному диаметру и осевой скорости, $Re = 4000 \div 40000$; давление $p = (1 \div 1.5) \cdot 10^5$ Па, степень закрутки скрученной ленты $s/d = 2.5 \div 6$, внутренний диаметр трубы $d = 0.01$ м, относительная длина трубы $l/d \geq 50$.

На входе для стабилизации течения применялась прямая гладкая труба с $l/d = 100$. На выходе рабочий участок заканчивается трубкой идентичного диаметра с гладкой внутренней поверхностью и $l/d = 200$. Замеры давления производились на входе и выходе из рабочего участка за 5 мм до и после шероховатой поверхности соответственно.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ гладкой трубы со скрученной лентой от числа Рейнольдса при различных степенях закрутки s/d . Очевидно, что с увеличением степени закрутки коэффициент ξ увеличивается, что обусловлено влиянием парного макровихря, имеющего место в каналах с закруткой. Хорошо виден переход от ламинарного режима к турбулентному в месте излома зависимости коэффициента ξ от числа Re . Этому переходу соответствует критическое число Рейнольдса $Re_{кр} \approx 15000 - 16000$, которое мало зависит от степени закрутки и несколько больше, чем по данным [6].

При ламинарном режиме с макровихрями ($Re < Re_{кр}$) $\xi \sim Re^n$ (рис.2), причем наблюдается слабая зависимость степени n от s/d , которую можно обобщить в линейном виде

$$n = -0.41 + 0.01 \cdot s/d. \quad (1)$$

Следует отметить, что зависимость степени n от закрутки, близкая (1), получена аналитическим путем и в работе [6] в виде:

$$n = -0.2 \cdot \left[1 + 1.7 \cdot (2 \cdot s/d)^{-0.5} \right]. \quad (2)$$

Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от степени закрутки при ламинарном режиме представлена на рис. 3.

Таким образом, окончательная зависимость, обобщающая с отклонением $\pm 5\%$ результаты экспериментов по гидравлическому сопротивлению в относительно длинных гладких трубах со вставленной скрученной лентой при ламинарном режиме, может быть представлена в виде:

$$\xi = 4.7 \cdot (s/d)^{-0.88} \cdot Re^{(-0.41 + 0.01 \cdot s/d)}. \quad (3)$$

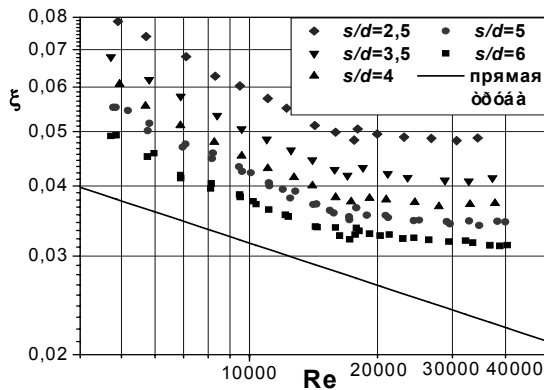


Рис. 1. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ гладкого канала со скрученной лентой от числа Рейнольдса при различных степенях закрутки s/d

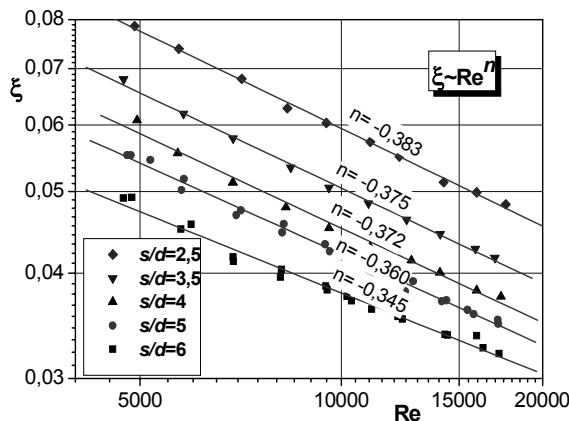


Рис.2. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ гладкого канала со скрученной лентой от числа Рейнольдса при ламинарном режиме с макровихрями ($Re < Re_{кр}$)

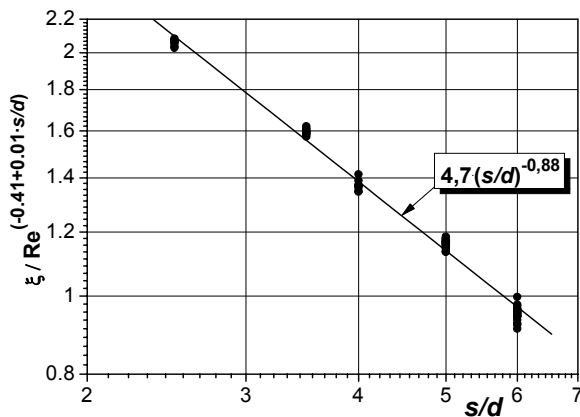


Рис.3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления гладкой трубы со скрученной лентой от степени закрутки при ламинарном режиме

На рис. 4 представлена зависимость гидросопротивления труб со скрученной лентой от числа Рейнольдса при турбулентном режиме с макровихрями. Как видно, величина ξ мало меняется с увеличением Re ($\xi \sim Re^{-0,05}$), т.к. наибольшее влияние на сопротивление оказывает закрутка потока. Обобщающую зависимость при турбулентном режиме можно представить в виде

$$\xi = 0,122 \cdot (s/d)^{-0,46} \cdot Re^{-0,05} \quad (4)$$

При этом отклонение экспериментальных данных от расчетных, как и при обобщении данных при ламинарном режиме, не превышает $\pm 5\%$.

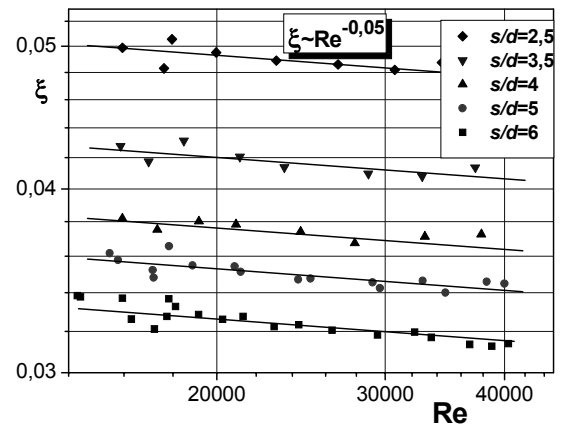


Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ гладкого канала со скрученной лентой от числа Рейнольдса при турбулентном режиме с макровихрями ($Re > Re_{кр}$)

На рис. 5 показано сравнение полученных зависимостей для ламинарного (3) и турбулентного (4) режимов течения с расчетными соотношениями других авторов [5-7]. Как видно, расчеты по формулам различных авторов могут существенно отличаться. Поэтому вопросы исследования гидродинамики в трубах со вставленной скрученной лентой остаются открытыми.

2.2. Гидравлическое сопротивление шероховатой прямой трубы

В проведенном исследовании режимные и конструктивные параметры менялись в следующих диапазонах: $Re=7000 \div 60000$, $p=(1 \div 1,5) \cdot 10^5$ Па, $d=0,01$ м, $l/d=50$, $\bar{\Delta}=0,0135 \div 0,0271$. Шероховатость трубы достигалась нарезкой метрической резьбы (рис.6) с шагами 0,5, 0,4, 0,3 и 0,25 мм. Входные и выходные условия описаны в разделе 2.1.

Результаты экспериментов показаны на рис. 7. Как и в аналогичных исследованиях [8, 9] в ходе кривых $\xi=f(Re)$ нет монотонности, наблюдаются участки максимумов и минимумов, смещающиеся по числу Re с изменением высоты или формы элементов шероховатости. В связи с этим зависимость, обобщающую экспериментальные данные, пока получить не удалось.

Очевидно, что с увеличением высоты выступов гидросопротивление увеличивается (до 2 раз по сравнению с гладкой трубой для рассмотренных $\bar{\Delta}$). Как видно, уменьшение $\bar{\Delta}$ приводит к увеличению диапазона по числу Рейнольдса без проявления шероховатости. Так, при высоких значениях $\bar{\Delta}$ влияние шероховатости проявляется во всем исследуемом диапазоне по числу Re , а в случае наименьшей высоты шероховатости ($\bar{\Delta}=0,0135$) ее проявление начинается только при $Re > 20000$, когда толщина вязкого подслоя становится меньше высоты выступов. Это соответствует классическим представлениям о влиянии шероховатости [10, 11]. Сле-

дует также отметить, что полученные данные только качественно соответствуют результатам работ [8, 9] при аналогичных значениях $\bar{\Delta}$, количественно же различие достигает до 50 %, что обусловлено влиянием не только величины $\bar{\Delta}$, но и формы выступов, расстояния между ними и др.

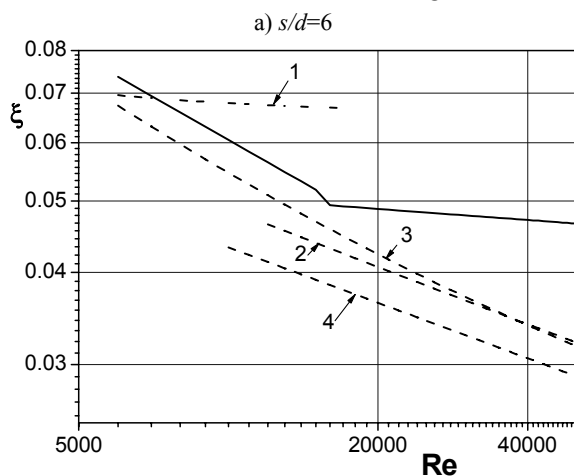
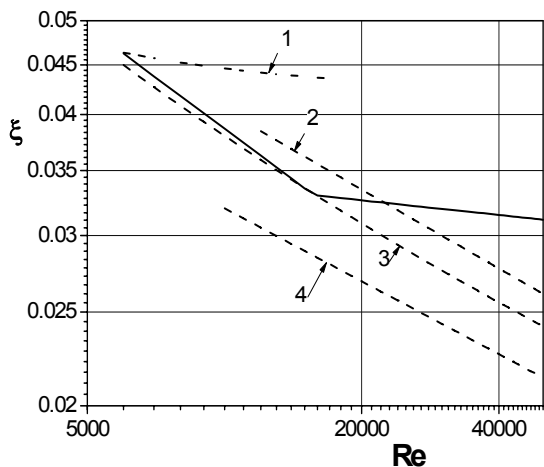


Рис. 5. Сравнение расчетных зависимостей для определения коэффициента гидравлического сопротивления в трубах со скрученной лентой (сплошная линия – расчет по формулам авторов (3) и (4); пунктирные линии: 1, 2 – по данным [6], 3 – по [5], 4 – по [7])



Рис. 6. Фотография среза резьбовой поверхности трубы

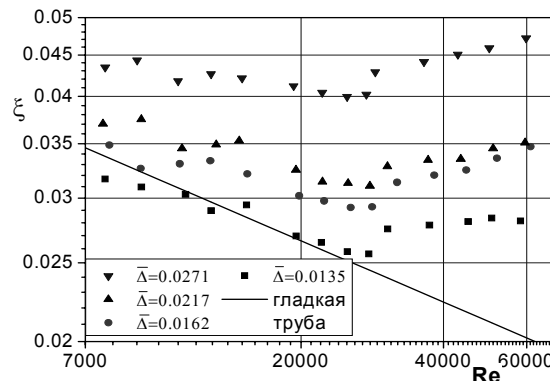


Рис. 7. Зависимость гидравлического сопротивления прямой шероховатой трубы от числа Рейнольдса

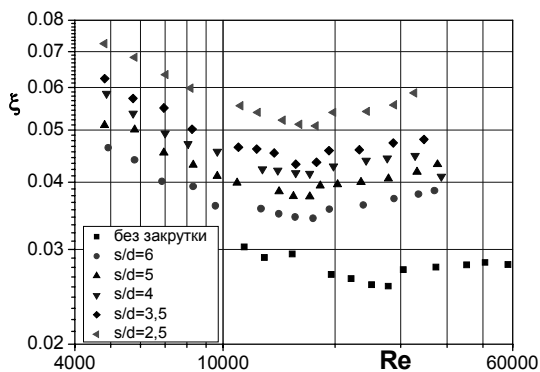
2.3. Гидравлическое сопротивление шероховатой трубы со вставленной скрученной лентой

Данное исследование выполнено в тех же диапазонах режимных конструктивных параметров, как и в разделе 2.2. На рис. 8 показаны зависимости гидравлического сопротивления шероховатых труб с различной закруткой скрученной ленты от числа Рейнольдса. Очевидно, что увеличение степени закрутки (уменьшение s/d) приводит к росту гидравлического сопротивления шероховатой трубы, который может составить при максимальной закрутке ($s/d = 2,5$) до 2 раз по сравнению с шероховатой трубой без закрутки. Как и в прямой трубе с закруткой, коэффициент гидравлического сопротивления сначала уменьшается с ростом числа Рейнольдса, а затем увеличивается по мере уменьшения толщины пограничного слоя по сравнению с высотой выступов шероховатости. Можно отметить, что кривые $\xi = f(Re)$ в канале с закруткой носят более монотонный характер – отмечен только один характерный минимум, который во всех случаях наблюдается при $Re = 16000 \div 17000$ и характеризует переход от ламинарного режима к турбулентному.

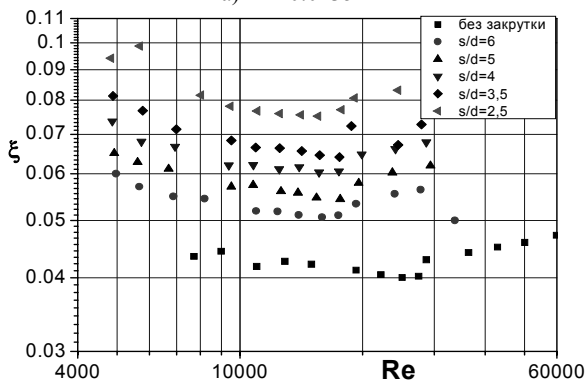
На рис. 9 показаны зависимости гидравлического сопротивления труб со скрученной лентой с различной шероховатостью стенок от числа Рейнольдса. Отмечено, что повышение степени закрутки (уменьшение s/d) приводит к увеличению диапазона по числу Рейнольдса без проявления шероховатости. Максимальное увеличение коэффициента гидравлического сопротивления при совместном действии закрутки и шероховатости по сравнению с прямой гладкой трубой в рассмотренном диапазоне режимных и конструктивных параметров составило до 400 %.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении дальнейших исследований гидродинамики в шероховатых трубах со вставленной скрученной лентой предполагается значительно расширить диапазоны режимных и конструктивных параметров и получить зависимости, обобщающие результаты экспериментов.

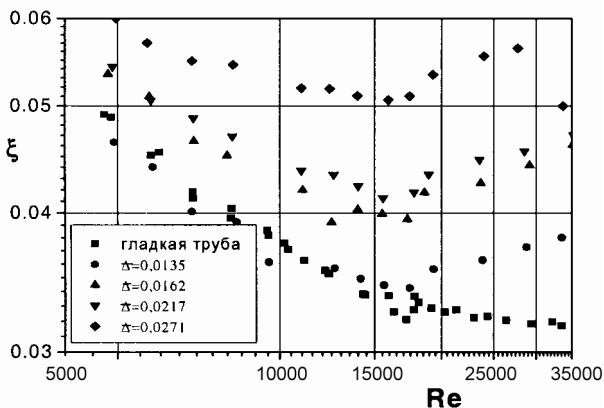


а) $\bar{\Delta} = 0.0135$

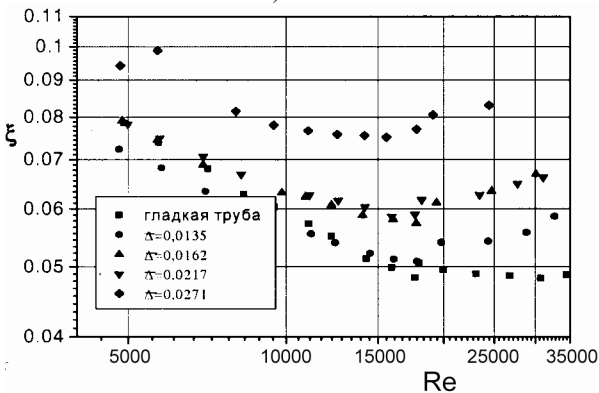


б) $\bar{\Delta} = 0.0271$

Рис. 8. Зависимости коэффициента гидравлического сопротивления шероховатых труб с различной закруткой скрученной ленты от числа Рейнольдса



а) $s/d=6$



б) $s/d=2,5$

Рис. 9. Зависимости коэффициента гидравлического сопротивления труб со скрученной лентой с различной шероховатостью стенок от числа Рейнольдса

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- d - внутренний диаметр трубы, м;
- l - длина трубы;
- p - давление, Па;
- Re - число Рейнольдса;
- s - шаг поворота скрученной ленты на 180° ;
- Δ - высота шероховатости, м;
- $\bar{\Delta} = \Delta/d$ - относительная высота шероховатости;
- ξ - коэффициент гидравлического сопротивления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. 176 с.
2. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. 284 с.
3. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 471 с.
4. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. М.: Машиностроение, 1990. 208 с.
5. Смитберг Е., Лэндис Ф. Трение и характеристики теплообмена при вынужденной конвекции в трубах с завихрителями из скрученной ленты // Теплопередача. 1964. Т.1. С.52-65.
6. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1970. 331 с.
7. Ибрагимов М.Х., Номофилов Е.В., Субботин В.И. Теплоотдача и гидродинамическое сопротивление при винтовом движении жидкости в трубе // Теплоэнергетика. 1961. №7. С.57-60.
8. Структура турбулентного потока и механизм теплообмена в каналах / М.Х. Ибрагимов, В.И. Субботин, В.П. Бобков и др. М.: Атомиздат, 1978. 296 с.
9. Исаченко В.П., Агабабов С.Г., Галин Н.М. Экспериментальное исследование теплоотдачи и гидравлического сопротивления при турбулентном течении воды в трубах с искусственной шероховатостью // Труды МЭИ «Теплообмен и гидравлическое сопротивление». 1965. Вып. 53. С.27-37.
10. Никурадзе И. Закономерности турбулентного движения в гладких трубах // Проблемы турбулентности / Под ред. М.А. Великанова и Н.Г. Швейковского. М., 1936. С.75-150.
11. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: пер. с нем. / Под ред. Л.Г. Лойцянского. М.: Наука, 1969. 744 с.