

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ КАНАЛОВ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ ЛАМИНАРНОМ РЕЖИМЕ ТЕЧЕНИЯ

А.А. Шейпак, В.В. Порошин

Рассмотрено ламинарное течение жидкости в каналах с различной величиной шероховатости. При относительной шероховатости более 0,1 гидравлические потери при ламинарном режиме течения увеличиваются, что объясняется уменьшением живого сечения потока. Для таких каналов предложено использовать термин «каналы с нерегулярной геометрией».

Ключевые слова: гидравлические потери, ламинарный режим течения, шероховатость, коэффициент потока, эквивалентный зазор.

Введение

Многочисленные эксперименты и расчеты, проведенные различными исследователями, показали зависимость гидравлических потерь для ламинарного режима течения жидкости (число Рейнольдса менее 2000) только от параметров потока жидкости. Величина относительной шероховатости – отношение абсолютной шероховатости к гидравлическому радиусу – изменялась при этом от 0,008 до 0,067 для труб с равномерно зернистой шероховатостью.

Для турбулентного режима течения жидкости (число Рейнольдса более 4000) увеличение шероховатости сверх некоторого значения приводило к увеличению гидравлических потерь. Понятие гидравлически гладких труб было введено для труб, шероховатость которых не влияла на величину гидравлических потерь. Необходимым условием для этого оказалось наличие области ламинарного течения жидкости, толщина слоя которой превышала шероховатость стенки трубы. Отметим также, что для так называемых труб с технической шероховатостью (трубы, полученные механической обработкой, литьем, прокаткой) закон зависимости гидравлических потерь от шероховатости один и тот же [1].

В последние годы появился ряд работ (обзор представлен в монографии [2]), в которых было показано существенное влияние шероховатости поверхности стенок каналов на гидравлические потери в узких каналах и при ламинарных режимах течения. Количественно это влияние

оценивалось по коэффициенту потока, равному отношению расхода жидкости через реальный щелевой канал к расходу жидкости через аналогичный канал с гладкими стенками при одинаковых перепадах давлений.

Увеличение гидравлических потерь за счет шероховатости стенок при турбулентном течении обусловлено ростом интенсивности турбулентных пульсаций. Разумеется, такой механизм не может реализоваться при течении через узкие каналы при малых числах Рейнольдса, соответствующих ламинарному течению.

Цель данной работы – изучение механизма влияния шероховатости поверхности стенок узкого канала на гидравлические потери при ламинарном режиме течения жидкости.

Некоторые аналитические решения для ламинарного течения жидкости

Существует небольшое число точных (аналитических) решений уравнений движения жидкости (уравнений Навье-Стокса [1]). Будем рассматривать так называемое стабилизированное течение, когда профили скоростей в каждом сечении канала идентичны. Такой случай, строго говоря, соответствует трубе бесконечной длины. Линии тока при этом являются прямыми линиями, параллельными оси трубы. Для трубы круглого сечения объемный расход жидкости Q вычисляли по формуле [1]

$$Q = \frac{\pi d^4 \Delta p}{128 \mu l}, \quad (1)$$

где Δp – перепад давлений (гидравлические потери), μ – вязкость жидкости; l , d – длина и диаметр трубы.

Известно также решение уравнений движения жидкости для ламинарного течения в канале, ограниченном двумя параллельными пластинами бесконечной протяженности. Расход жидкости через канал, для которого расстояние между плоскостями h и ширина b известны, можно вычислить по формуле [1]

$$Q = \frac{\Delta p h^3 b}{12 \mu l}. \quad (2)$$

Зависимости (1) и (2) хорошо подтверждают-ся экспериментами при условии ламинарного режима течения жидкости и $l \gg d$, $b \gg h$, $l \gg h$, что выполняется при течении в зазорах.

Для труб произвольного сечения вводится понятие гидравлического радиуса, равного отношению площади сечения A к величине его периметра Π :

$$R_h = \frac{A}{\Pi}.$$

Для круглого сечения $R_h = d/4$, для узкой щели $R_h = \delta/2$, где δ – толщина щели.

Модельные задачи для плоского канала и круглой трубы

Влияние шероховатости на расход жидкости через щели при ламинарном режиме течения изучали для различных методов изготовления материальной части. В зависимости от технологического процесса (литье, штамповка, фрезеровка, точение, шлифовка, притирка) получали различные формы микрогеометрии (микротопографии) поверхности, которая могла влиять на гидравлические потери в каналах. Относительная шероховатость (отношение среднего отклонения профиля к среднему размеру щели) в различных литературных источниках колеблется от 0,1 до 1.

Математическую модель строили на основе уравнений Рейнольдса для смазочного слоя жидкости. Система дифференциальных уравнений для этого случая – линейная, отрыв потока для неподвижных стенок канала исключен, конфузорные и диффузорные каналы при всех прочих равных условиях по величине гидравлических потерь идентичны [3]. В рамках принятой математической модели реальная геометрия поверхности щели представляется кусочно-

прямоугольной. Разумеется, гидравлические характеристики такого канала при одинаковых средних значениях расстояний между двумя стенками будут существенно зависеть от высоты (размера по вертикали) различных прямоугольников и их чередования, моделирующих реальную микрогеометрию канала. В то же время течение на границах прямоугольников в рамках уравнений Рейнольдса для смазочного слоя жидкости не может быть описано адекватно.

Следовательно, в качестве модельной задачи может быть рассмотрено течение в канале с внезапным изменением площади его сечения в сравнении с течением в канале с постоянной площадью сечения. И.И. Никурадзе за средний диаметр трубы с шероховатой стенкой принимал диаметр трубы с гладкой стенкой, имеющей тот же внутренний объем [1]. Этот объем определяли экспериментально при заполнении канала водой. В случае плоского канала аналогичная величина будет совпадать со средним арифметическим значений зазоров.

Рассмотрим сначала цилиндрический канал постоянного сечения и трубу, образованную двумя цилиндрами (рис. 1).

Из условия равенства объемов двух каналов легко получить зависимость между их диаметрами:

$$d_*^2 = \frac{d^2}{2} + \frac{D^2}{2}.$$

Запишем условие равенства потерь давления для двух каналов при расходах жидкости Q и Q_1 :

$$\frac{128 \mu L Q}{\pi d_*^4} = \frac{128 \mu L Q_1}{2 \pi d^4} + \frac{128 \mu L Q_1}{2 \pi D^4},$$

где Q – расход жидкости через трубу длиной L и диаметром d_* ; Q_1 – расход жидкости через ступенчатую трубу с диаметрами D и d .

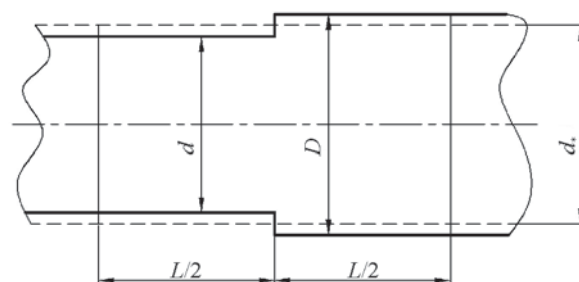


Рис. 1. Модельная геометрия цилиндрического канала

После несложных преобразований получим зависимость для коэффициента потока:

$$K = \frac{Q_1}{Q} = \frac{8d^4 D^4}{(d^4 + 2d^2 D^2 + D^4)(d^4 + D^4)},$$

или

$$K = \frac{8x^4}{(1 + 2x^2 + x^4)(1 + x^4)},$$

где

$$x = \frac{D}{d} = 1 + \frac{2(D-d)d_*}{d_*^2}.$$

Величину $2(D-d)/d_*$ можно в первом приближении трактовать как относительную шероховатость по И.И. Никурадзе [1], причем

$$\frac{2(D-d)}{d_*} = \frac{2\sqrt{2}(x-1)}{\sqrt{1+x^2}} \approx 2(x-1).$$

Рассмотрим течение жидкости через щель, ограниченную полубесконечными плоскостями (рис. 2).

В этом случае $h_* = (h+H)/2$ и условие равенства потерь давления для двух каналов при различных расходах жидкости Q и Q_1 можно записать следующим образом:

$$\frac{3}{2} \frac{Q \mu L}{h_*^3} = \frac{3}{2} \frac{Q_1 \mu L}{2h^3} + \frac{3}{2} \frac{Q_1 \mu L}{2H^3}. \quad (3)$$

Используя выражение (3), можно получить зависимость для коэффициента потока:

$$K = \frac{16h^3 H^3}{(h+H)^3 (h^3 + H^3)} = \frac{16x^3}{(1+x)^3 (1+x^3)},$$

$$x = \frac{H}{h} = 1 + \frac{H-h}{h_*}.$$

Для плоского канала величину $(h-H)/h_*$ можно трактовать как относительную шероховатость по И.И. Никурадзе [1]. Очевидно, что

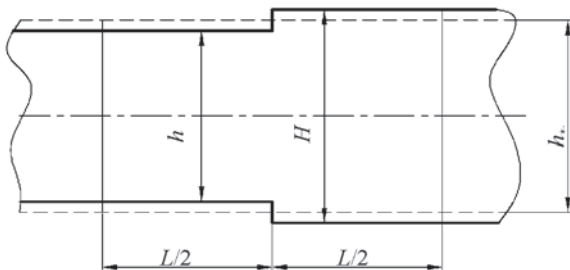


Рис.2. Модельная геометрия плоского канала

$$\frac{H-h}{h_*} = \frac{2(x-1)}{1+x} \approx x-1.$$

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента потока K от отношения x для цилиндрического и плоского каналов.

Из рис. 3 видно, что при $0,9 \leq x \leq 1,1$ коэффициент потока отличается от единицы в пределах точности измерений. При более широком диапазоне изменения отношения x коэффициент K становится существенно меньше единицы. Для цилиндрического канала влияние отношения x на коэффициент более интенсивное, чем для плоского. При равных отношениях x цилиндрический канал имеет большую относительную шероховатость.

Сравнение среднего и эквивалентного зазоров

Анализ механизма течения в узких щелях удобно проводить, используя понятие эквивалентного зазора, имеющего гладкие стенки и гидравлические потери, равные потерям в реальном зазоре при прочих равных условиях [3].

Для цилиндрического канала (см. рис. 1) можно записать

$$\frac{128\mu L Q}{\pi d_{ekv}^4} = \frac{128\mu L Q}{2\pi d^4} + \frac{128\mu L Q}{2\pi D^4}.$$

После несложных преобразований получим зависимость для отношения диаметра эквивалентного зазора d_{ekv} к среднему диаметру d_* :

$$\frac{d_{ekv}}{d_*} = \sqrt[4]{K}.$$

Аналогичную зависимость получим для плоского канала

$$\frac{h_{ekv}}{h_*} = \sqrt[3]{K},$$

где h_{ekv} , h_* – эквивалентное и среднее расстояния между плоскостями.

Таким образом, эквивалентный зазор всегда меньше среднего зазора. При увеличении отно-

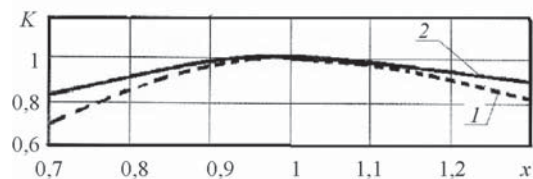


Рис. 3. Зависимость коэффициента потока K от отношения x для каналов:
1 — цилиндрического; 2 — плоского

сительной шероховатости более 0,1 ее величина начинает существенно влиять на количественные характеристики потока при ламинарном течении за счет уменьшения живого сечения потока. По всей вероятности при величине выступов и впадин на поверхности канала одного порядка со средним зазором целесообразно не использовать термин гидравлической шероховатости. Возможно, более логично назвать эти каналы каналами с нерегулярной геометрией. Очевидно, такие каналы могут существовать и при достаточно больших линейных размерах, например в нефтяных и газовых скважинах.

Отметим, что по всей вероятности понятие эквивалентного зазора имеет преимущество перед понятием коэффициента потока, так как непосредственно связано с геометрией канала.

Заключение

Рассмотрено влияние шероховатости на механизм течения в узких щелях при ламинарном режиме течения жидкости. Показано, что при

увеличении шероховатости уменьшается площадь эквивалентного сечения, что приводит к росту гидравлических потерь при одинаковых расходах жидкости или к уменьшению расхода жидкости при одинаковых перепадах давлений.

Для каналов с относительной шероховатостью более 0,1 целесообразно использовать термин «каналы с нерегулярной геометрией».

Список литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. – 712 с.
2. Богомолов Д.Ю., Порошин В.В., Радыгин В.Ю. и др. Математическое моделирование течения жидкости в щелевых каналах с учетом реальной микротопографии поверхности их стенок. М.: МГИУ, 2010. – 160 с.
3. Шейнак А.А. Гидравлика и гидропневмопривод: учебник, ч.1: Основы механики жидкости и газа. 5-е изд., перераб. и доп. М.: МГИУ, 2006. – 266 с.

Материал поступил в редакцию 15.06.2011

ШЕЙНАК Анатолий Александрович

E-mail: asheyp@mail.msiu.ru
asheyp@msiu.ru
Тел. +7 (495) 620-39-55

Доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, изобретатель СССР, профессор кафедры электротехники, теплотехники, гидравлики и энергетических машин ФГБОУ ВПО «МГИУ». Сфера научных интересов – механика жидкости и газа, лопаточные машины, термодинамика и теплопередача, биомеханика, история науки и техники, ракетная техника и технология, двигатели внутреннего сгорания и технология автомобилестроения. Автор свыше 200 научных работ, в том числе трех монографий, учебника, 40 изобретений.

ПОРОШИН Валерий Владимирович

E-mail: vporoshin@mail.ru
Тел.: +7 (495) 620-39-68

Доктор технических наук, профессор кафедры технологий и металлорежущих систем автомобилестроения ФГБОУ ВПО «МГИУ», почетный работник высшего образования РФ, лауреат премии Правительства РФ. Сфера научных интересов – трибология, контроль качества поверхности, математическое моделирование гидродинамических процессов. Автор более 100 научных трудов и патентов.