

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ (λ) ОТ ЧИСЛА РЕЙНОЛЬДСА (Re) ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГИДРОПРИВОДУ

Выполнены экспериментальные исследования зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re на стенде «Гидравлика» применительно к гидроприводу. Уточнена формула по определению коэффициента гидравлического трения для турбулентного режима движения жидкости. Построен по результатам исследований график зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса Re с анализом четырех зон этой зависимости.

Ключевые слова: гидравлика, турбулентный режим, коэффициент гидравлического трения, число Рейнольдса, движение жидкости.

Известно, что при ламинарном режиме движения жидкости потери энергии (напора) вдоль потока объясняются сопротивлением сил внутреннего трения и, следовательно, зависят от вязкости жидкости. Коэффициент сопротивления трения по длине λ при ламинарном движении являются функцией только критерия Рейнольдса, а от материала и состояния поверхности стенок, окружающих поток, не зависят. Иное положение наблюдается при турбулентном движении. Как показывают опыты коэффициент сопротивления трения λ по длине потока, учитывающий гидравлические условия течения при турбулентном режиме, зависят не только от вязкости жидкости, но и от шероховатости стенок Δ/d , т.е. $\lambda = f\left(Re, \frac{\Delta}{d}\right)$. Поэтому достоверность расчета потерь энергии при турбулентном движении во многом зависят от правильного определения коэффициента сопротивления трения по длине λ .

Исследованию сопротивления труб посвящено много работ в нашей стране и за рубежом [1–4]. Однако, до сих пор из-за сложности турбулентного течения нет общего теоретического метода определения λ для труб гидроприводов.

Существует много эмпирических формул для определения λ [2, 4]. Каждая из этих формул действительна только для тех условий, для которых она получена. Это практически усложняет выбор оптимального значения λ для каждого конкретной системы трубопроводной системы гидроприводов. Сложность и многообразие факторов, обуславливающих движение жидкости, в большинстве случаев не позволяет ограничиваться строго теоретическим решением для того или иного случая движения жидкости. Полученные решения нуждаются в поправочных коэффициентах, которые определяются в результате экспериментальных работ. Это подтверждается проведенными нами исследованиями зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса на экспериментальном стенде «Гидравлика», созданного применительно к гидроприводу.

В состав стенда входят шестеренный насос, системы трубопроводов и контрольно-измерительная аппаратура. Исходные данные гидравлической системы: длина исследуемого участка $\ell_{аб} = 0,43$ м, внутренний диаметр трубопровода $d_{вн} = 6$ мм, плотность минерального масла ≈ 900 кг/м³. Замеряемые параметры: давление на границах участка трубопровода манометрами, время прохождения заданного объема жидкости замеряемое с помощью электронного секундомера, а объем проходимой жидкости измеряется с помощью расходомера, также измеряется температура рабочей жидкости. Изменение переменных величин расхода Q , скорости U , давления P , коэффициента кинематической вязкости ν осуществлялось изменением температуры при работе гидравлической системы экспериментального стенда.

На основании опытных данных, определенных на стенде в диапазоне температур 18–40 °С определялись коэффициенты гидравлического трения λ и число Рейнольдса, используя ранее проведенные теоретические и экспериментальные исследования [1–4].

Гидравлический коэффициент трения определялся используя формулу Дарси [1–4]

$$h_e = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{U^2}{2g}, \text{ м}$$

$$\lambda = \frac{2g \cdot d}{\ell} \cdot \frac{h_e}{U^2} = 0,274 \frac{h_e}{U^2}, \text{ где } h_e = \frac{P_1 - P_2}{\rho \cdot g}, \text{ м}$$

$$U = \frac{Q}{S}, \text{ м/с,}$$

где P_1, P_2 – давление жидкости по манометрам МН1 и МН2, Па; ρ – плотность жидкости, 900 кг/м³; Q – объем жидкости пройденный за время t .

Число Рейнольдса определялось на основании решения системы уравнений:

- для ламинарного режима движения жидкости

$$\begin{cases} \lambda_{on} = 0,274 \frac{h_e}{U^2} \\ \lambda = \frac{A}{Re} \end{cases} \quad (1) \text{ и } (2)$$

где A – величина, зависящая от состояния трубопроводов, вида жидкости (вода, масло) и др.

Для маслопроводов и гидропроводов обычно принимают [4]. Тогда

$$Re_{лам} = \frac{75}{\lambda_{on}}, \quad (3)$$

а $\lambda_{он.кр} = \frac{75}{2320} = 0,0323$ – теоретический коэффициент трения при $Re_{кр}$.

- для турбулентного режима движения жидкости

$$\begin{cases} \lambda_{on} = 0,274 \frac{h_e}{U^2} \\ \lambda = B \left(\frac{\Delta_{\vartheta}}{d} + \frac{75}{Re} \right)^{0,25} \end{cases} \quad (4)$$

где $\Delta_{\vartheta} \approx 0,002 \text{ мм}$ – эквивалентная шероховатость; B – коэффициент, определяемый при значениях $Re = Re_{кр}$, $\lambda_{он.кр} = 0,0323$.

$$B = \frac{\lambda_{кр}}{\left(\frac{\Delta_{\vartheta}}{d} + \frac{75}{2320} \right)^{0,25}} \quad (5)$$

Для условий экспериментального стенда «Гидравлика» $B = 0,0763$.

$$\text{Re}_{\text{турб}} = \frac{75}{\left(\frac{\lambda_{\text{он}}}{B}\right)^4 - \frac{\Delta_{\text{э}}}{d}} = \frac{75}{(13,1 \cdot \lambda_{\text{он}})^4 - 0,00033(3)} \quad (6)$$

Следует отметить, что формулы (4); (6) являются справедливыми для всех зон турбулентного движения. Так на границах зоны III эта формула преобразуется, хорошо отвечающие условиям опытов, зависимости для λ : для гидравлически гладких труб она превращается в формулу Блазиуса, а для зоны вполне шероховатых труб (автомодельная область) в формулу Шифринсона [], только с одним условием: вместо коэффициента 0,11 применяется коэффициент B , определяемый по формуле (5).

На основе полученных экспериментальных данных по вышеизложенной методике был построен график зависимости коэффициента Дарси λ от числа Рейнольдса Re (рисунок).

Анализируя этот график, видим, что при ламинарном режиме движения все опытные точки (значения λ) лежат на одной линии. В логарифмических координатах – это прямая I, описываемая уравнением (3).

При турбулентном режиме движения и гидравлически гладких трубах все точки описываются также на одной прямой линией II.

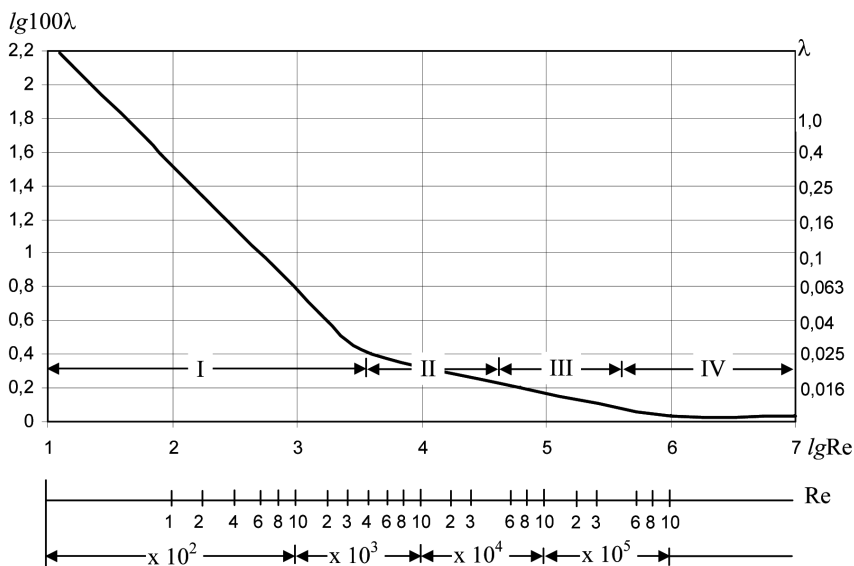


График зависимости коэффициента Дарси (λ) от числа Рейнольдса (Re)

Как видно из графика, при турбулентном режиме движения между зонами гладких и вполне шероховатых труб (зона IV) существует еще одна (переходная) зона III, в которой λ зависит как от Re так и от Δ/d . Плавное уменьшение λ с возрастанием Re в этой зоне получила хорошую сходимость с расчетными данными коэффициента гидравлического трения по рекомендуемой формуле.

Заключение

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено следующее:

1. На результатах исследований (опытные данные) построен график зависимости $\lambda = f(Re)$ и $\Delta/d = \text{const}$, в диапазоне температур $T = 18-40^\circ$, которым выявлены четыре зоны зависимости $\lambda = f(Re, \Delta/d)$: одна для ламинарного режима движения и три – для турбулентного.

2. Предложена усовершенствованная формула по определению коэффициента гидравлического трения для турбулентного режима движения жидкости (3).

3. В режиме движения жидкости между зонами гладких и вполне шероховатых труб (переходная зона III) характер кривой $\lambda = f(Re, \Delta/d)$ имеет плавное уменьшение λ с возрастанием Re и с высокой точностью согласуется с расчетными данными коэффициента гидравлического трения по рекомендуемой формуле (3).

4. Предложенная методика по определению коэффициента гидравлического трения рекомендуется применять при расчете маслопроводов гидропроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винников В. А., Каркашадзе Г. Г. Гидромеханика. Учебник. – М.: МГГУ, 2003. – 302 с.
2. Гудилин Н. М. и др. Гидравлика и гидропривод: Учебное пособие. – М.: МГГУ, 2001. – 520 с.
3. Пастов И. Л., Еленкин В. Ф. Гидравлика. Методические указания. – М.: МГГУ, 2005. – 65 с.
4. Гейер В. Г., Дулин В. С., Заря А. Н. Гидравлика и гидропривод. Учебник. – М.: Недра, 1991. – 331 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Секисова Ирина Артуровна¹ – кандидат технических наук, зав. кафедрой, e-mail: Sekisova.irina@yandex.ru,

Булгаков Иван Семенович¹ – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник,

Терехин Евгений Петрович — кандидат технических наук, главный инженер, e-mail: bis-34@mail.ru, ЗАО «НИИКМА-Опыт»,
¹ Губкинский институт (филиал) Московского государственного открытого университета имени В.С. Черномырдина.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 5, pp. 5–10.

UDC 532

I.S. Bulgakov, I.A. Sekisova, E.P. Teryekhin

**INVESTIGATION OF THE DEPENDENCE
OF THE COEFFICIENT OF HYDRAULIC FLUID
FRICTION (λ) ON THE REYNOLDS NUMBER (Re)
WITH RESPECT TO HYDRAULIC DRIVE**

The experimental investigations of the dependence of the coefficient of hydraulic friction λ from Reynolds number Re on the stand «Hydraulics» with reference to a hydraulic drive are executed. The formula by definition of the coefficient of hydraulic friction for a turbulent fluid motion is specified. The schedule of dependence of factor of a hydraulic friction λ from Reynolds's Re number with the analysis of four zones of this dependence by results of researches is constructed.

Key words: hydraulics, a turbulent mode, the coefficient of hydraulic friction, the Reynolds number, fluid motion.

AUTHORS

*Sekisova I.A.*¹, Candidate of Technical Sciences, Head of Chair,
e-mail: Sekisova.irina@yandex.ru,

*Bulgakov I.S.*¹, Candidate of Technical Sciences,
Assistant Professor, Senior Researcher,

Teryekhin E.P., Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer,
e-mail: bis-34@mail.ru, CJSC «NICMA-Experience»,
309501, Stary Oskol, Russia,

¹ Gubkin Institute (Division), Victor Chernomyrdin Moscow
State Open University, 309186, Gubkin, Russia.

REFERENCES

1. Vinnikov V.A., Karkashadze G.G. *Gidromekhanika*. Uchebnik (Hydromechanics. Textbook), Moscow, MGGU, 2003, 302 p.

2. Gudilin N.M. *Gidravlika i gidroprivod*. Uchebnoe posobie (Hydraulics and hydraulic drive. Educational aid), Moscow, MGGU, 2001, 520 p.

3. Pastoev I.L., Elenkin V.F. *Gidravlika*. Metodicheskie ukazaniya (Hydraulics. Instructional guidelines), Moscow, MGGU, 2005, 65 p.

4. Geyer V.G., Dulin V.S., Zarya A.N. *Gidravlika i gidroprivod*. Uchebnik (Hydraulics and hydraulic drive. Textbook), Moscow, Nedra, 1991, 331 p.

