

С. А. Коваленко

## К РАСЧЕТУ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Точность гидравлического расчета напорных трубопроводов во многом зависит от правильности выбора коэффициентов гидравлического сопротивления  $\lambda$ , определяющих потери напора, величину расхода жидкости и т. д. Поэтому в последние годы проведено большое количество экспериментальных, натуральных и теоретических исследований по определению гидравлических закономерностей движения жидкости в напорных трубах [1, 4, 5]. Получены полуэмпирические и эмпирические зависимости, позволяющие находить достаточно точные значения  $\lambda$  для труб, работающих в условиях, близких к тем экспериментальным условиям, на основании которых определены эмпирические коэффициенты, входящие в эти формулы. Однако имеющиеся формулы для расчета коэффициента гидравлического сопротивления мало пригодны в тех случаях, когда необходимо определить гидравлическое сопротивление труб, изготовленных из новых материалов или новым способом, или трубопроводов с измененными конструкцией и расположением стыков.

В связи с расширением использования трубопроводов различного назначения в промышленности, строительстве и сельском хозяйстве совершенствуется технология их изготовления и способов стыковки, применяются новые материалы для производства труб. Наша промышленность выпускает несколько видов пластмассовых труб: из винипласта и полиэтилена низкого и высокого давления, полипропилена, фторопласта и стеклопластиков; налаживается производство составных — пластмассобетонных — труб. Расчетные формулы для труб из этих материалов не дают точных результатов, и изучение гидравлических характеристик таких труб необходимо.

Значительно влияет на значение  $\lambda$  и изменение способа производства. В качестве примера на рис. 1 представлена зависимость  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(\lg Re)$  для винипластовых труб, изготовленных различными способами. На основании данных М. М. Сапожникова [4] можно заключить, что для винипластовых труб замена штангпрессования способом непрерывной шнековой экструзии снижает значение коэффициента гидравлического трения почти на 20%.

Значительно влияет на сопротивление трубопроводов конструкция, количество и расположение стыков. Экспериментальные исследования Ф. А. Шевелева [5] показали влияние сварных соединений на коэффициент  $\lambda$  новых стальных труб, работающих в квадратичной области сопротивлений (табл. 1).

Приведенные данные табл. 1 подтверждают, что при изменении способа производства труб, конструкции и расположения стыков трубопроводов необходимы специальные исследования гидравлических сопротивлений. Постановка таких опытов сложна, требует большой точности, связана с материальными затратами. Поэтому в настоящей статье предлагается метод, позволяющий значительно сократить число опытов при экспериментальном определении  $\lambda$  для труб из новых материалов, труб, бывших в эксплуатации различные сроки, труб, изготовленных новым способом.

Рассмотрим турбулентный поток жидкости в круглой цилиндрической трубе радиусом  $r_0$  (рис. 2). Распределение осредненных скоростей вдоль радиуса в таком потоке можно описать дифференциальной формулой [2]:

$$U_z = V \sqrt{4gr_0i_0} \frac{d \left( \frac{1}{V \lambda_z} z \right)}{dz}, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $i_0$  — гидравлический уклон;  $z$  — глубина потока, на которой определяется скорость, отсчитываемая от стенки трубы и изменяющаяся от 0 до  $r_0$ ;  $\lambda_z$  — коэффициент гидравлического трения трубы, гидравлический радиус которой равен  $z$ .

Пусть известна эпюра осредненных скоростей в этом потоке, полученная экспериментально. Имеющуюся эпюру можно описать уравнением

$$U_z = f(z). \quad (2)$$

Тогда

$$f(z) = V \sqrt{4gr_0i_0} \frac{d \left( \frac{1}{V \lambda_z} z \right)}{dz}$$

или

$$f(z)dz = V \sqrt{4gr_0i_0} d \left( \frac{1}{V \lambda_z} z \right). \quad (3)$$

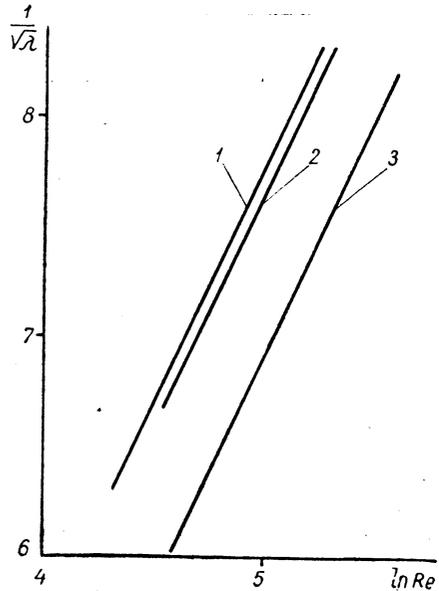


Рис. 1. Зависимость  $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = f(\lg Re)$  для виниловых труб  $d=100$  мм по опытным данным М. М. Сапожникова: 1 — линия гладких труб; 2 — для труб, изготовленных шнековой экструзией; 3 — для труб, изготовленных штампипрессованием.

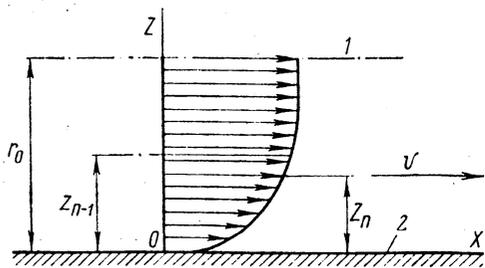


Рис. 2. Схема равномерного потока в напорной трубе: 1 — ось трубы; 2 — стенка трубы.

Полагая, что коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  для рассматриваемой трубы радиусом  $r_0$  (см. рис. 2) определен экспериментально, из уравнения (3) можно найти значение  $\lambda_n$  для трубы с любым значением радиуса  $r_n$ . Очевидно, что  $r_n$  должно быть меньше  $r_0$ , поскольку  $f(z)$  задана в пределах от 0 до  $r_0$ . Для того чтобы подсчитанные

Т а б л и ц а 1

Диаметр трубы $d$ , мм	Длина трубы $L$ , мм	Расстояние между стыками $l$ , м	Коэффициент гидравлического трения $\lambda$
155,1	9	без стыков	0,0188
155,1	9	3,0	0,0223
155,1	9	1,5	0,0240
155,1	9	0,75	0,0261
155,1	9	0,375	0,0295

значения  $\lambda$  не отклонялись более чем на 3—5% от экспериментальных, следует соблюдать условие  $r_n \geq \frac{r_0}{2}$ . Если необходимо определить  $\lambda$  для

трубы радиусом, значительно меньшим  $\frac{r_0}{2}$ , то подсчет следует производить методом последовательных приближений, т. е. первоначально определить  $\lambda_1$  для трубы радиусом  $r_1 \geq \frac{r_0}{2}$ , затем  $\lambda_2$  для трубы радиусом  $r_2 \geq \frac{r_1}{2}$  и т. д., пока  $\lambda_n$  не будет искомой величиной для трубы радиусом  $r_n \geq \frac{r_{n-1}}{2}$ . При этом уравнение (3) следует проинтегрировать в пределах

$$\int_{z_n}^{z_{n-1}} f(z) dz = V \sqrt{4gr_0i_0} \int_{z_n}^{z_{n-1}} d \left( \frac{1}{V\lambda_z} z \right), \quad (4)$$

где  $z_{n-1}$  — глубина потока, отсчитываемая от стенки трубы и равная гидравлическому радиусу трубы, коэффициент гидравлического трения которой  $\lambda_{n-1}$  известен;  $z_n$  — глубина потока, отсчитываемая от стенки трубы и равная гидравлическому радиусу трубы, для которой нужно определить значение  $\lambda_n$ .

После интегрирования уравнение (4) приводим к виду

$$\frac{1}{V\lambda_n} = \frac{1}{z_n V\lambda_{n-1}} \left[ z_{n-1} - \frac{1}{v_{n-1}} \int_{z_n}^{z_{n-1}} f(z) dz \right], \quad (5)$$

где  $v_{n-1}$  — средняя скорость потока в трубе радиусом  $r_{n-1}$ . Учитывая, что использованная формула (1) описывает распределение скоростей при различных режимах движения жидкости [2, 3], полученная

зависимость (5) также применима для определения  $\lambda$  при турбулентном режиме движения жидкости как в квадратичной, так и в докватратичной области сопротивлений. Далее это положение подтверждается экспериментальными данными.

*Квадратичная область сопротивлений.* Известно, что в квадратичной области сопротивлений коэффициент гидравлического трения не зависит от числа Рейнольдса и для трубы с заданной шероховатостью есть величина постоянная. Поэтому при одной известной эпюре осредненных скоростей в трубе диаметром  $d_0$  зависимость (5) позволяет определять  $\lambda$  для труб любого диаметра  $d$  при условии, что  $d < d_0$  и труба изготовлена из того же материала и тем же способом. В качестве примера сопоставим значения  $\lambda$ , вычисленные с помощью зависимости (5), с опытными данными [5]. Эпюра распределения осредненных скоростей в новой стальной трубе диаметром 302 мм при  $v_{cp} = 30,9$  м/сек, построенная по опытным данным Ф. А. Шевелева [5], описывается уравнением

$$U_z = f(z) = 8,23 \lg z + 43,96. \quad (6)$$

Выражение (6) для  $f(z)$  подставлено в уравнение (5), и подсчитанные при этом значения  $\lambda$  для труб различных диаметров представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Диаметр трубы $d$ , мм	Коэффициент гидравлического трения $\lambda$	
	по данным Ф. А. Шевелева	по формуле (5)
Новые стальные трубы без стыков		
302	0,0161	0,0161
155,1	0,0188	0,0183
78,5	0,0215	0,0219
52,4	0,0237	0,0242
26,8	0,0277	0,0274
16,0	0,0315	0,0306
Новые чугунные трубы		
301	0,0202	0,0202
152	0,0246	0,0241
51,5	0,0335	0,0329

**Примечание.** Расстояние между стыками для трубы диаметром 301 мм—3,0 м, диаметром 152 мм—3,1 м, диаметром 51,5 мм—2,0 м.

Для новой чугунной трубы диаметром 301 мм при  $v_{cp} = 36,3$  м/сек эпюра распределения осредненных скоростей описывается уравнением

$$U_z = f(z) = 11,30 \lg z + 52,70. \quad (7)$$

*Докватратичная область сопротивлений.* В докватратичной области сопротивлений коэффициент гидравлического трения представляет собой функцию вида  $\lambda = f(d, Re, n)$ , где  $n$  — коэффициент шероховатости. Для труб, изготовленных из одного материала и одним и тем же способом, эта зависимость упрощается:  $\lambda = f(d, Re)$ . Чтобы найти значение

$\lambda$  для труб любого диаметра  $d$ , необходимо иметь несколько (по крайней мере четыре) экспериментально определенных эпюр осредненных скоростей при различных числах Рейнольдса только в одной трубе диаметром  $d_0$ . При этом необходимо, чтобы  $d_0$  было больше  $d$ . Описывая заданные эпюры соответствующими уравнениями вида  $U_z = f(z)$  и подставляя в уравнение (5), получим несколько значений  $\lambda$  [столько значений, сколько задано эпюр и соответственно уравнений  $U_z = f(z)$ ], отвечающих определенным значениям  $Re$ . Это позволяет построить график  $\lambda_n = f(Re)$  для данной трубы радиусом  $r_n$ . Таким образом можно построить графики для любых заданных диаметров труб, так же как это

Таблица 3

Диаметр трубы $d$ , мм	Число Рейнольдса $Re$	Средняя скорость $v$ , м/сек	Коэффициент гидравлического трения $\lambda$	
			по формуле Ф. А. Шевелева	по формуле (5)
155,1	95,0	0,586	0,0205	—
78,5	43,6	0,533	0,0244	0,0248
52,4	28,7	0,516	0,0265	0,0265
26,2	13,2	0,484	0,0316	0,0303
15,15	7,38	0,441	0,0373	0,0363

делается на основании экспериментов. В табл. 3 в качестве примера представлены подсчитанные значения  $\lambda$  для новых стальных труб без стыков описанным способом в сравнении со значениями  $\lambda$ , подсчитанными по формуле Ф. А. Шевелева.

### Выводы

1. Установленная связь распределения осредненных скоростей по сечению трубы и коэффициента гидравлического трения в виде зависимости (5) позволяет шире использовать уже имеющиеся опытные данные по распределению скоростей с целью определения гидравлических сопротивлений потока.

2. Представляется возможным по одной эпюре (для квадратичной зоны сопротивлений), полученной экспериментально в трубе достаточно большого диаметра  $d_0$ , определить коэффициент гидравлического трения  $\lambda_n$  для трубы любого диаметра  $d_n$  при условии, что  $d_n < d_0$  и труба изготовлена из того же материала и тем же способом производства. Для доквадратичной области сопротивлений достаточно экспериментально получить несколько эпюр осредненных скоростей только в одной трубе диаметром  $d_0$ , для того чтобы описать  $\lambda_n = f(Re)$  для трубы любым диаметром  $d_n$ , изготовленной из того же материала и тем же способом производства.

3. Предлагаемый метод подсчета коэффициента гидравлического трения позволяет значительно сократить число экспериментов при исследовании движения турбулентных потоков жидкости в напорных трубах, гидравлические характеристики которых еще недостаточно изучены.

## Литература

1. *Альтшуль А. Д.* Гидравлические потери на трение в трубопроводах. М., 1963.
2. *Кузнецова С. А.* О распределении осредненных скоростей в плоском равномерном потоке при различных режимах движения жидкости. Сб. «Использование и охрана водных ресурсов Белоруссии», ч. 2. Минск, 1966.
3. *Кузнецова С. А.* О распределении осредненных скоростей в напорных трубах при турбулентном режиме жидкости. Сб. «Вопросы водохозяйственного строительства», Минск, 1968.
4. *Сапожников М. М.* Гидравлические закономерности турбулентного движения в трубах из различных материалов. Л., 1964.
5. *Шевелев Ф. А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного течения в трубах. М., 1953.