

О РАСЧЕТЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИАФРАГМ В ПЕРЕХОДНОЙ И ЛАМИНАРНОЙ ОБЛАСТЯХ ТЕЧЕНИЯ

д.т.н. Кондратьев А.С., Огородник К.Ф., Фриха М.
Московский политехнический университет, Москва, Россия
ask41@mail.ru

В случае гидравлических машин и аппаратов местные гидравлические сопротивления, как правило, составляют определяющую часть суммарных потерь напора при работе любой гидромашин. Наиболее подробным справочником, выдержавшим множество изданий в нашей стране и изданным за рубежом, является «Справочник по гидравлическим сопротивлениям» И.Е. Идельчика. Вместе с тем, анализ, проведенный в цитируемой литературе, показал, что в зависимости от года издания справочника И.Е. Идельчика для одинаковых местных сопротивлений различия в численных значениях одного и того же местного гидравлического сопротивления могут достигать кратности. Целью настоящей работы является анализ приведенных в справочнике рекомендаций по расчету коэффициента гидравлического сопротивления диафрагм (отверстий) с любыми формами краев для различных условий перетекания потока в переходной и ламинарной областях внутри трубопровода постоянного поперечного сечения. В частности показано, что для расчета коэффициента заполнения сечения диафрагмы рекомендуются табличные значения, и приведена аналитическая зависимость, различия в численных значениях которой достигают 15 %, что вносит неопределенность в результаты конкретных расчетов. В значительно большей степени аналогичное положение имеет место и при использовании рекомендаций по расчету коэффициента гидравлического сопротивления. В этом случае также приведенные численные табличные значения коэффициентов гидравлического сопротивления трения при прохождении потока через отверстие и рассчитанные по приведенной аналитической зависимости различаются в кратности, что свидетельствует об отсутствии связи между ними. Этот вопрос требует дальнейшего специального рассмотрения.

Ключевые слова: коэффициент местного гидравлического сопротивления, диафрагма, ламинарный, переходный, режим течения.

Для цитирования: Кондратьев А.С., Огородник К.Ф., Фриха М. О расчете коэффициента местного гидравлического сопротивления диафрагм в переходной и ламинарной областях течения // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 1 (47). С. 32–37. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-32-37.

Введение

Расчет гидравлических потерь напора на местных гидравлических сопротивлениях является значимой составляющей общих гидравлических потерь напора гидросети. В случае гидравлических машин и аппаратов местные гидравлические сопротивления, как правило, составляют определяющую часть суммарных потерь напора при работе любой гидромашин. Естественно, в связи с унификацией большей части элементов гидравлического оборудования проводилось обобщение, в первую очередь, результатов экспериментальных исследований, что в сочетании с расчетно-теоретическими представлениями позволяло обосновать примени-

мость эмпирических и (или) теоретических зависимостей для широкой области изменения характеристик течения. Со временем эти материалы обобщались в виде различных справочников по гидравлическим сопротивлениям как в линейной части, так и для местных гидравлических сопротивлений (см., например [1, 2]). Наиболее подробным справочником, выдержавшим множество изданий в нашей стране и изданным за рубежом, является «Справочник по гидравлическим сопротивлениям» И.Е. Идельчика [3, 4]. Неудивительно, что часть рекомендаций, изложенных в [3], используют и в более поздних справочных изданиях другие авторы, например, в [5]. Анализ, проведенный в работе [6], показал, что в за-

висимости от года издания справочника И.Е. Идельчика для одинаковых местных сопротивлений различия в численных значениях одного и того же местного гидравлического сопротивления могут достигать кратности. К сожалению, большой объем справочного материала не позволяет в отдельных случаях избежать неточностей, приводящих к фактическим ошибкам в рекомендациях.

Целью настоящей работы является анализ рекомендаций по расчету коэффициента гидравлического сопротивления диафрагм (отверстий), приведенных в работе [3].

Методы проведения исследований

Конкретно анализируются рекомендации, касающиеся расчета коэффициентов гидравлического сопротивления диафрагмы (отверстия) с любыми формами краев для различных условий перетекания потока в переходной и ламинарной областях ($Re = W_0 D_g / \nu < 10^4 \div 10^5$) внутри трубопровода постоянного поперечного сечения ($F_1 = F_2$) [3]. Поперечное сечение диафрагмы показано на рисунке.

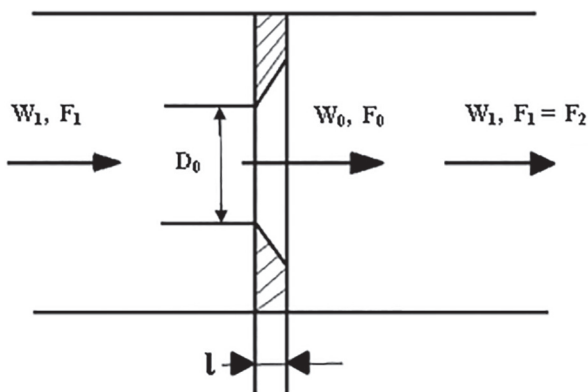


Рис. Схема течения жидкости через диафрагму конечной толщины

Fig. Scheme of fluid flow through a diaphragm of finite thickness

Поскольку трубопровод имеет постоянное поперечное сечение, то скорости жидкости до и после диафрагмы равны ($W_1 = W_2$). Так как поперечное сечение диафрагмы определяется гидравлическим диаметром $D_g = 4F_0 / \Pi_0$, где F_0 – площадь поперечного сечения диафрагмы, а Π_0 – ее смоченный периметр, отсюда следует, что в общем случае поперечное сечение диафрагмы может отличаться от окружности. Толщина диафрагмы l , а D_0 – диаметр диафрагмы при круговом отверстии.

При малых числах Рейнольдса $Re < 10$ коэффициент гидравлического сопротивления определяется выражением [3]:

$$\xi = \Delta p / (\rho W_1^2 / 2) = (33 / Re)(F_1 / F_0)^2, \quad (1)$$

где Δp – перепад давления на диафрагме.

Из этого выражения следует, что формально при $F \rightarrow 0$ $\xi \rightarrow \infty$, то есть фактическое течение жидкости через диафрагму прекращается ввиду отсутствия последней.

В области небольших чисел Рейнольдса $10 < Re < 30$ [3]

$$\xi = \Delta p / (\rho W_1^2 / 2) = (33 / Re)(F_1 / F_0)^2 + \varepsilon_{0Re} \xi_{1KB}, \quad (2)$$

где значения величины ξ_{1KB} предлагается определять по соответствующим диаграммам, приведенным в предшествующих разделах справочника [3].

Последнее пояснение представляется весьма неопределенным, поскольку в этих разделах анализировались другие, отличные от рассматриваемого случаи движения жидкости через местные сопротивления другой, отличной от анализируемой, конкретной формы диафрагмы (отверстия) и режимом течения жидкости.

Коэффициент ε_{0Re} , характеризующий степень заполнения диафрагмы, определяется с использованием табличных значений или может быть рассчитан по эмпирической зависимости

$$\varepsilon_{0Re} = \sum_0^5 a_i (\lg Re)^i, \quad (3)$$

где $a_0 = 0,461465$; $a_1 = -0,2648592$; $a_2 = 0,203047$; $a_3 = -0,06602521$; $a_4 = 0,01325519$; $a_5 = -0,001058041$.

В таблице 1 указаны табличные значения функции ε_{0Re} , приведенные в [3] и рассчитанные по формуле (3).

Причины достаточного значимого расхождения табличных и расчетных значений величины ε_{0Re} в [3], достигающего 15 %, не комментируются. Также не приводится расчетная формула, по которой определены табличные величины. При проведении практических расчетов использование табличных значений усложняет процедуру расчета, поскольку будет необходимо использовать процедуру интерполяции для произвольных значений чисел Рейнольдса. Формула (3) представляется также неоправданно усложненной. Используя «Онлайн-калькулятор: Аппроксимация функ-

Значения функции ε_{0Re} в зависимости от числа Рейнольдса

Table 1. Function ε_{0Re} values depending on the Reynolds number

Re	10	30	10 ²	4·10 ²	10 ³	4·10 ³	10 ⁴	4·10 ⁴	10 ⁵	4·10 ⁵
Таб. знач.	0,34	0,36	0,45	0,58	0,65	0,74	0,80	0,85	0,90	1,0
Формула (3)	0,35	0,36	0,39	0,47	0,53	0,65	0,74	0,87	0,94	0,96
Формула (4)	0,33	0,37	0,42	0,49	0,54	0,63	0,70	0,81	0,90	1,05

ции одной переменной», получим простое выражения для расчета величины ε_{0Re} :

$$\varepsilon_{0Re} = 0,2531Re^{0,1103}. \quad (4)$$

В нижней строке таблицы 1 приведены величины ε_{0Re} , определенные по формуле (4), которые достаточно удовлетворительно в ламинарной области течения согласуются с расчетными значениями, определенными по формуле (3).

В области $30 < Re < 10^4 \div 10^5$ рекомендуется следующая зависимость [3]:

$$\xi = \Delta p / (\rho W_1^2 / 2) = \xi_\varphi (F_1 / F_0)^2 + \varepsilon_{0Re} \xi_{1кв}. \quad (5)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ_φ определяется с использованием приведенных в [3] табличных значений (в этом случае также не приводится расчетная формула, по которой определены табличные величины) или может быть рассчитан по следующей зависимости, также приведенной в [3].

$$\xi_\varphi = [18,78 - 7,768(F_1 / F_0) + 6,337(F_1 / F_0)^2] \times \exp\{-0,942 - 7,246(F_0 / F_1) - 3,878(F_0 / F_1)^2\} \times (\lg Re). \quad (6)$$

В таблице 2 приведены значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ_φ , представленные в [3] и рассчитанные по формуле (6) на первой и второй строках.

В работе [3], видимо, имела место опечатка, и вместо приведенного значения $F_0 / F_1 = 0,1$ указывалась величина $F_0 / F_1 = 0$. То же самое приведено и в [5], что указывает на чисто механический перенос заимствованной информации.

Табличные значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ_φ , приведенные в работе [3], можно сказать, практически не совпадают с расчетными значениями, определенными по формуле (6). В таблице 2 значение $\xi_\varphi = 0$ означает, что оно меньше предшествующего значения ξ_φ при $F_0 / F_1 = \text{const}$ в кратности и фактически близко к нулю.

Вместо зависимости (6) можно использовать аппроксимирующую зависимости экспоненциально вида

$$\xi_\varphi = A Re^{-B}. \quad (7)$$

Для значений $0,1 \leq (F_0 / F_1) \leq 0,5$ в таблице 2 в нижних строках приведены величины ξ_φ , определенные по формуле (7) для: $F_0 / F_1 = 0,1$ при $A = 580,5337$ и $B = -0,742$; $F_0 / F_1 = 0,2$ при $A = 183,036$ и $B = -1,1051$; $F_0 / F_1 = 0,3$ при $A = 61,3181$ и $B = -1,4942$; при $F_0 / F_1 = 0,4$ $A = 65,4109$ и $B = -2,0401$, которые практически точно согласуются с расчетными значениями, определенными по формуле (6) при тех же значениях величин (F_0 / F_1) . То есть, в общем случае коэффициенты A и B зависят от величины (F_0 / F_1) .

Во всех случаях табличные значения величин ξ_φ во все большей степени превосходят расчетные значения, определяемые по формулам (6) или (7). Это расхождение табличных и расчетных значений величины ξ_φ практически свидетельствует об отсутствии какой-либо связи между ними.

Отметим также, что на рисунке обозначена толщина диафрагмы l , которая не фигурирует в рекомендуемых расчетных соотношениях, хотя, безусловно, влияет на общее гидравлическое сопротивление диафрагмы и, казалось бы, должно быть отражено в приводимых табличных или расчетных зависимостях.

В работе [3] при обосновании рассмотренной процедуры определения коэффициента гидравлического сопротивления диафрагмы имеется ссылка на работу автора [6], в которой в частности рассматривается влияние вязкости на гидравлическое сопротивление диафрагм представленного типа. Для больших чисел Рейнольдса используется выражение подобное (5):

$$\xi = \Delta p / (\rho W_1^2 / 2) = \{\xi_\varphi + \varepsilon_{0Re}[(0,5 + \tau(1 - F_0 / F_1)^{1/2}) \times (1 - F_0 / F_1) + (1 - F_0 / F_1)^2] + \lambda l / D_g\} (F_1 / F_0)^2, \quad (8)$$

Таблица 2

Значения коэффициента гидравлического сопротивления ξ_{φ} от числа Re
Table 2. The values of the coefficient of hydraulic resistance ξ_{φ} from the Re number

(F_0/F_1)	Re								
	30	10^2	$4 \cdot 10^2$	10^3	$4 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$
0,1	1,94	0,89	0,64	0,39	0,22	0,15	0,11	0,04	0,01
	46,3	19,0	6,80	3,45	1,24	0,63	0,38	0,11	0,068
	46,5	19,0	6,81	3,45	1,23	0,625	0,374	0,11	0,068
0,2	1,78	0,85	0,57	0,36	0,20	0,13	0,09	0,03	0,01
	3,21	0,85	0,18	0,066	0,014	0,0052	0,0024	0,0004	0
	3,21	0,85	0,18	0,066	0,014	0,0052	0,0024	0,0004	0
0,3	1,57	0,75	0,43	0,30	0,17	0,10	0,07	0,02	0,01
	0,38	0,062	0,008	0,002	0,0002	0	0	0	0
	0,38	0,063	0,008	0,002	0,0002	0	0	0	0
0,4	1,35	0,57	0,28	0,19	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01
	0,054	0,0057	0,00035	0	0	0	0	0	0
	0,053	0,0054	0,00032	0	0	0	0	0	0
0,5	1,10	0,34	0,12	0,07	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
	0,008	0,0004	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,6	0,85	0,19	0,06	0,03	0,01	0,01	0	0	0
	0,001	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,7	0,58	0,11	0,03	0,02	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,8	0,40	0,06	0,02	0,01	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9	0,20	0,03	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0

где τ – эмпирическая поправочная функция, учитывающая влияние формы и толщины стенки в месте отверстия на его гидравлическое сопротивление; λ – коэффициент сопротивления трения потока жидкости внутри диафрагмы (отверстия), который определяется по локальной скорости $W_0 = W_1(F_1 / F_0)$ в отверстии.

Величина τ определяется в табличном виде и может быть рассчитана по эмпирическим зависимостям:

$$\tau = [2,4 - (l / D_g)] \cdot 10^{-0}; \quad (9)$$

$$\theta = 0,25 + 0,535(l / D_g)^8 / [0,05 + (l / D_g)^7].$$

В таблице 3 приведены значения параметра τ в зависимости от безразмерной длины диафрагмы (l/Dg) .

В этом случае табличные значения τ достаточно удовлетворительно совпадают с расчетными величинами τ , определенными по формуле (9), отличие достигает примерно 8 %.

Из сравнения выражений (5) и (8) получим

$$\xi_{1k} = \{[(0,5 + \tau(1 - F_0 / F_1)^{1/2})(1 - F_0 / F_1) + (1 - F_0 / F_1)^2] + \lambda l / D_g\} (F_1 / F_0)^2. \quad (10)$$

Использование выражений (8) или (10) методически представляется более обоснованным, поскольку член $\lambda(l / D_g)(F_1 / F_0)^2$ в явном виде определяет вклад гидродинамического трения при течении жидкости внутри диафрагмы в суммарное гидравлическое сопротивление. Отметим, что если диафрагма трансформируется в трубу меньшего диаметра большей протяженности, то в этом случае

Значения параметра τ в зависимости от безразмерной длины диафрагмы (l/D_g)

Table 3. Parameter τ values depending on the dimensionless length of the aperture (l/D_g)

(l/D_g)	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,4
Т.з.	1,35	1,22	1,10	0,84	0,42	0,24	0,16	0,07	0,02	0
Формула (9)	1,35	1,24	1,11	0,78	0,41	0,24	0,16	0,06	0,02	0

также возможно использование такого представления.

На основе проведенного анализа в промежуточной области чисел Рейнольдса $10 < Re < 30$, учитывая ожидаемый непрерывный характер изменения гидравлического сопротивления внутри сравнительно небольшого диапазона чисел Рейнольдса, допустим расчет коэффициента гидравлического сопротивления провести, используя линейную интерполяцию, по формуле

$$\xi = \xi_{Re=10} - [(\xi_{Re=10} - \xi_{Re=30}) / 20](Re - 10), \quad (11)$$

где $\xi_{Re=10}$ рассчитывается по формуле (1) при $Re = 10$; $\xi_{Re=30}$ рассчитывается по формуле (8) при $Re = 30$.

Заключение

Выполненный анализ показал, что, рекомендации, содержащиеся в работе [3], относящиеся к расчету потерь давления при течении жидкости через диафрагмы (отверстия) с любыми формами краев, включают, можно сказать, противоречивые утверждения в части определения величин коэффициента гидравлического сопротивления ξ_ϕ при величинах $(F_0 / F_1) > 0,3$ и нуждаются в уточнении.

Показано, что представление табличных значений какого-либо параметра или функции без соответствующего, описывающего его расчетного математического выражения, может приводить к некорректному пониманию рекомендаций.

Литература

1. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. П.Г. Киселева. М. Энергия. 1977. 157 с.
2. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М. Недра. 1982. 224 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Под ред. М.О. Штейнберга. М. Машиностроение. 1992. 672 с.

4. Idel' chik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance. Begell House. 1996. 790 p.
5. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем. Под ред. Юрьева А.С. С.-Пб, АНО НПО «Мир и семья». 2001. 1154 с.
6. Кондратьев А.С. Аппроксимирующие зависимости для расчета коэффициентов сопротивления конусов, полусферы, диафрагмы и решетки в свободном и стесненном потоках. Проб. аксиом. в гидрогазод. Вып. 14. М. Век книги. 2007. С. 62–70.
7. Идельчик И.Е. Учет влияния вязкости на гидравлическое сопротивление диафрагм и решеток. Теплоэнергетика. 1960. № 9. с. 75–80.

Reference

1. Spravochnik po gidravlicheskim raschetam [Handbook on hydraulic calculations]. pod red. P.G. Kiseleva. M. Energiya. 1977. 157 p.
2. Al'tshul' A.D. Gidravlicheskiye soprotivleniya [Hydraulic resistance]. Moscow. Nedra Publ., 1982. 224 p.
3. Idel'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniya [Reference book on hydraulic resistance]. Pod red. M.O. Shteynberga. Moscow. Mashinostroyeniye Publ. 1992. 672 p.
4. Idel' chik I.E. Handbook of Hydraulic Resistance. Begell House. 1996. 790 p.
5. Spravochnik po raschetam gidravlicheskih i ventilyatsionnykh system [Handbook for calculations of hydraulic and ventilation systems]. Pod red. Yur'yeva A.S. S. – Pb, ANO NPO «Mir i sem'YA». 2001. 1154 p.
6. Kondrat'yev A.S. Approximating dependences for calculating the drag coefficients of cones, hemisphere, diaphragm and grating in free and constrained flows. Prob. aksiom. v gidrogaod. Vyp. 14. M. Vek knigi. 2007, pp. 62–70 (in Russ.).
7. Idel'chik I.E. Calculation of the effect of viscosity on the hydraulic resistance of diaphragms and grids. Teploenergetika. 1960. No 9, pp. 75–80 (in Russ.).

CALCULATION OF THE COEFFICIENT OF LOCAL HYDRAULIC DIAPHRAGM RESISTANCE IN TRANSITIONAL AND LAMINAR AREAS OF FLOW

DSc in Engineering **A.S. Kondratyev, K.F. Ogorodnik, M. Frikha**
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
ask41@mail.ru

In the case of hydraulic machines and devices, local hydraulic resistances, as a rule, constitute the determining part of the total head losses during the operation of any hydraulic machine. The most detailed reference book, which has gone through many editions in our country and published abroad, is the "Reference book on hydraulic resistance" by I.E. Idelchik. At the same time, the analysis carried out in the cited literature showed that, depending on the year of publication of the reference book by I.E. Idelchik, for the same local resistance, the difference in the numerical values of the same local hydraulic resistance can reach a multiplicity. The purpose of this work is to analyze the recommendations given in the handbook for calculating the hydraulic resistance coefficient of diaphragms (holes) with any edge shapes for various conditions of flow overflow in the transition and laminar regions inside a pipeline of constant cross-section. In particular, it is shown that tabular values are recommended for calculating the filling factor of the diaphragm section and an analytical dependence is given, the differences in the numerical values of which reach 15%, which introduces uncertainty in the results of specific calculations. To a much greater extent, a similar situation takes place when using the recommendations for calculating the coefficient of hydraulic resistance. In this case, also, the given numerical tabular values of the coefficients of hydraulic friction resistance when the flow passes through the hole and calculated from the given analytical dependence, differ in multiplicity, which indicates the absence of a connection between them. This issue requires further special consideration.

Keywords: coefficient of local hydraulic resistance, diaphragm, laminar, transient, flow regime.

Cite as: Kondratyev A.S., Ogorodnik K.F., Frikha M. Calculation of the coefficient of local hydraulic diaphragm resistance in transitional and laminar areas of flow. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 1 (47), pp. 32–37 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-32-37.