

## ПРОБЛЕМА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НАПОРА ПО ФОРМУЛЕ ЛЕЙБЕНЗОНА В ЗОНЕ СМЕШАННОГО ТРЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМА

Произведен сравнительный анализ экспериментальных величин коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  в зоне смешанного трения турбулентного режима со значениями, полученными по наиболее известным расчетным зависимостям. Установлено, что при условии определения эквивалентной шероховатости  $k_s$  на основе решения обратной задачи любая из этих формул может быть использована для расчета  $\lambda$  в зоне смешанного трения с погрешностью, достаточной при инженерных расчетах.

С целью снижения погрешности вычисления потерь напора на трение  $h_\tau$  по формуле Л.С.Лейбензона выполнена аппроксимация формулы А.Д.Альтшуля, в результате которой получены новые коэффициенты  $\beta$  и  $m$  и уточнены граничные числа Рейнольдса для зоны смешанного трения.

A comparative analysis of experimental values of the  $\lambda$  hydraulic resistance factor in the zone of mixed friction of the turbulent mode (ZMF) was made with values, calculated with the most common calculation dependencies. It has been established that if the  $k_s$  equivalent roughness defined on the basis of an inverse problem solution, any of these formulas can be used for  $\lambda$  calculation in ZMF with an error, permissible for engineering calculations.

In order to decrease inaccuracy of the friction head  $h_\tau$  calculation with application of the Leybenzon formula, an approximation of the Altschul formula was executed, as a result of which new factors  $\beta$  and  $m$  for ZMF were calculated and the Reynolds boundary numbers were specified for this zone.

Определение потерь напора при движении жидкости по магистральным трубопроводам является важнейшей задачей, которая периодически решается для любого промышленного трубопровода.

Ключевым слагаемым общих потерь напора являются потери напора на трение, расчет которых выполняется по формуле Дарси – Вейсбаха. Между тем для решения многих задач технологического расчета реальных трубопроводов большой интерес представляет разновидность формулы Дарси – Вейсбаха – формула академика Л.С.Лейбензона, привлекающая своей простотой, наглядностью и выражающая в явной форме зависимость потерь напора на трение от расхода в трубопроводе,

$$h_\tau = \beta \frac{Q^{2-m} v^m L}{D^{5-m}}, \quad (1)$$

где  $Q$  – объемный расход;  $v$  – кинематическая вязкость жидкости;  $L, D$  – длина и диаметр трубопровода;  $\beta, m$  – коэффициенты, величина которых постоянна для каждой зоны трения.

Однако применение формулы Лейбензона возможно лишь в тех случаях, когда выражение для расчета коэффициента гидравлического сопротивления имеет вид

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}^m}, \quad (2)$$

где  $A, m$  – постоянные числовые коэффициенты, величина которых зависит от режима течения жидкости.

Для случая турбулентного течения жидкости в зоне смешанного трения выражение вида (2), которое бы позволило найти коэффициенты  $\beta$  и  $m$  без каких-либо допущений, отсутствует. Более того, отсутствует и единое мнение в вопросе аналитического

определения  $\lambda$  в данной зоне. Теоретическая гидравлика на сегодняшний день располагает большим количеством зависимостей для расчета коэффициента Дарси в зоне смешанного трения, полученных на основе полумпирических теорий турбулентности. В системе АК «Транснефть» предпочитают пользоваться эмпирической формулой Ланга, рекомендуемой Нормами технологического проектирования магистральных нефтепроводов [7]. Однако эта формула не находит применения в учебной литературе, где предпочтение отдается формуле А.Д.Альтшуля [1, 2, 4, 6, 8].

В данном контексте очевидна необходимость решения двух задач. Первая заключается в выявлении формулы для расчета  $\lambda$ , применение которой в зоне смешанного трения наиболее предпочтительно, а вторая – в получении коэффициентов  $\beta$  и  $m$  в формуле Лейбензона для данной зоны.

При решении первой задачи нами были выполнены сравнительные расчеты величин  $\lambda$  по формулам Ланга, А.Д.Альтшуля, И.А.Исаева, В.И.Черникина и Н.З.Френкеля. При этом величина эквивалентной шероховатости  $k_3$  была определена путем решения обратной задачи для каждой зависимости. Фактические величины  $\lambda$ , полученные опытным путем для труб различных диаметров при перекачке воды и керосина, были взяты из работы И.А.Исаева [5]. Сопоставительный анализ экспериментальных величин  $\lambda$  со значениями коэффициента Дарси, рассчитанными по вышеуказанным зави-

симостям, показал, что при условии определения эквивалентной шероховатости  $k_3$  методом решения обратной задачи все формулы показывают одинаково допустимый (в пределах погрешности определения  $\lambda$ ) результат. Из таблицы видно, что среднеквадратическая погрешность расчета по всем вышеперечисленным зависимостям, за исключением формулы Ланга, составляет от 1,22 до 3,19 %. В формулу Ланга эквивалентная шероховатость  $k_3$  не входит и поэтому среднеквадратическая погрешность расчетных величин составляет до 3,5 %.

Таким образом, если правильно найти  $k_3$ , то вполне допустимо определять коэффициент гидравлического сопротивления  $\lambda$  по любой из сравниваемых формул.

На этом основании можно сделать еще один важный вывод: расчет  $\lambda$  для магистральных нефтепроводов вполне может быть выполнен по классическим формулам гидравлики.

Перейдем теперь к задаче определения коэффициентов  $\beta$  и  $m$  в формуле Лейбензона применительно к зоне смешанного трения. До 1971 г. рекомендации по их определению отсутствовали. Однако в 1971 г. была опубликована работа [3], где для зоны смешанного трения были получены величины искомых коэффициентов:

$$m = 0,123;$$

$$A = 10^{0,1271g_3 - 0,627}; \quad (3)$$

$$\beta = 0,802A.$$

Среднеквадратичная погрешность расчета  $\lambda$  по формулам различных авторов

Диаметр труб, мм	Вид перекачиваемой жидкости	По формуле Ланга		По формуле И.А.Исаева		По формуле В.И.Черникина		По формуле Н.З.Френкеля		По формуле А.Д.Альтшуля	
		$\Delta$ , %	$k_3$ , мм	$\Delta$ , %	$k_3$ , мм	$\Delta$ , %	$k_3$ , мм	$\Delta$ , %	$k_3$ , мм	$\Delta$ , %	
359	Вода	2,68	0,1451	2,12	0,2965	2,37	0,1398	2,34	0,1488	2,79	
306	Вода	3,5	0,1165	2,26	0,2425	2,61	0,1142	2,58	0,1253	3,15	
256	Вода	3,27	0,1247	2,67	0,2582	2,86	0,1221	2,86	0,1283	3,19	
205	Вода	2,56	0,1192	1,78	0,2433	1,87	0,1149	1,88	0,1167	2,11	
359	Керосин	2,5	0,1617	2,17	0,3133	2,03	0,1497	2,07	0,1456	2,09	
306	Керосин	2,44	0,1118	1,43	0,2238	1,48	0,1085	1,43	0,1031	1,83	
256	Керосин	1,74	0,1402	1,52	0,2664	1,66	0,1291	1,55	0,1180	2,02	
205	Керосин	2,06	0,1368	1,38	0,2564	1,22	0,1252	1,25	0,1107	1,36	

За прошедшие более чем 30 лет других значений коэффициентов  $m$ ,  $A$ , и  $\beta$  предложено не было.

В работе [3] указанные коэффициенты были найдены из условия, что на нижней границе зоны смешанного трения ( $Re = Re_I$ ) еще справедлива формула Блазиуса, а на верхней ( $Re = Re_{II}$ ) уже можно пользоваться формулой Шифринсона. Иными словами, авторы работы [3] стремились к тому, чтобы на границе зоны смешанного трения не было скачков расчетных величин  $\lambda$ . Погрешность замены реальных значений коэффициента гидравлического сопротивления формулой (2) авторов [3] не интересовала (хотя она составляет около 5 %). На наш взгляд, это неверно, так как необходимо стремиться к наименьшей погрешности аппроксимации реальных значений  $\lambda$  формулой вида (2). Поэтому возникла необходимость в уточнении коэффициентов  $m$ ,  $A$ , и  $\beta$  для зоны смешанного трения турбулентного режима.

Приведем выражение Альтшуля к виду

$$\lambda = \frac{0,11(68 + \varepsilon Re)^{0,25}}{Re^{0,25}}. \quad (4)$$

Так как зона смешанного трения турбулентного режима ограничивается числами Рейнольдса (по А.Д.Альтшулю)  $Re_I = 10/\varepsilon$  и  $Re_{II} = 500/\varepsilon$ , то величина произведения  $\varepsilon Re$  удовлетворяет неравенству  $10 \leq \varepsilon Re \leq 500$ .

Применяя метод наименьших квадратов, легко показать, что на этом интервале функция  $0,11(68 + \varepsilon Re)^{0,25}$  со среднеквадратичной погрешностью 2,7 % может быть аппроксимирована выражением  $0,206(\varepsilon Re)^{0,15}$ .

Соответственно, формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления в зоне смешанного трения турбулентного режима принимает вид

$$\lambda = \frac{0,206\varepsilon^{0,15}}{Re^{0,1}}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что если исходить из наименьшей погрешности аппроксимации формулы А.Д.Альтшуля, то величины коэффициентов в зоне смешанного трения равны

$$m = 0,1; A = 0,206\varepsilon^{0,15}; \beta = 0,0166\varepsilon^{0,15}. \quad (6)$$

Очевидно, что в зоне смешанного трения роль вязких сил оказывается еще меньше, чем считалось долгие годы.

Имея зависимость (5), стало возможным уточнить и границы зоны смешанного трения. Приравняв формулу (5) формуле Блазиуса при  $Re = Re_I$ , находим, что  $Re_I = 17,5/\varepsilon$ . Используя формулу (5) и Шифринсона, аналогично получаем  $Re_{II} = 531/\varepsilon$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамзон Л.С.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости. Расчет простых и сложных трубопроводов / Л.С.Абрамзон, Л.И.Коротков. Уфа: Изд-во Уфимского нефт. ин-та, 1980.
2. *Агапкин В.М.* Справочное руководство по расчетам трубопроводов / В.М.Агапкин, С.Н.Борисов, Б.Л.Кривошеин. М.: Недра, 1987.
3. *Белоусов В.Д.* Определение потери напора на трение в области смешанного трения по формуле Л.С.Лейбензона / В.Д.Белоусов, В.С.Сафонов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. 1971. № 8.
4. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. О.М.Штейнберга. 3-е изд., перераб., доп. М.: Машиностроение, 1992.
5. *Исаев И.А.* Экспериментальное определение коэффициентов гидравлических сопротивлений в прямых нефтепроводных трубах и фитингах // Вопросы транспорта, хранения нефти и машиностроения / Тр. МНИ. Вып.17. М.: Гостоптехиздат, 1956.
6. Проектирование и эксплуатация нефтебаз / С.Г.Едигаров и др. М.: Недра, 1982.
7. РД 153-39.4-113-01. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов. М.: Гипротрубопровод, 2002.
8. Техника и технология транспорта и хранения нефти и газа: Учебное пособие для вузов / Ф.Ф.Абузова, Р.А.Алиев, В.Ф.Новоселов и др. М.: Недра, 1992.