

УДК 535.5 (075.8)

Е.М. ГАЛЬПЕРИН

кандидат технических наук, профессор кафедры водоснабжения и водоотведения
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

А.Л. ЛУКС

доцент кафедры гидравлики и теплотехники
Самарский государственный архитектурно-строительный университет,
заведующий научно-исследовательской лабораторией «Теплоэнерготехника»,
ведущий научный сотрудник
Самарский государственный университет

Е.А. КРЕСТИН

кандидат технических наук, доцент кафедры гидравлики и теплотехники
Самарский государственный архитектурно-строительный университет

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБАХ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ РАСЧЕТЕ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

DETERMINATION OF HEAD LOSSES IN PIPE-LINES LOSSES DURING HYDRAULIC CALCULATIONS
FOR RINGED WATER NET

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований потерь напора в промышленных трубопроводах с технической шероховатостью. Выявлены основные факторы, влияющие на гидравлические потери. В исследованиях Никурадзе величины коэффициентов сопротивления трения λ определялись для искусственной равнозернистой песчаной шероховатости. На практике в водоснабжении применяют трубопроводы с естественной технической шероховатостью. Она отличается разнообразной структурой и может быть волнистой и пилообразной, иметь штукатурку (защитные покрытия).

Дан сопоставительный анализ различных методов расчета гидравлических потерь напора трубопроводов в кольцевой водопроводной сети и выработаны рекомендации по их использованию.

Ключевые слова: *трубопровод, напор, водоснабжение, шероховатость, расчет, гидравлические потери.*

This paper provides the results of theoretical and experimental researches of head losses in industrial pipe-lines, which have technical coarseness. In the Nikuradze's researches values for frictional resistance coefficient λ were determined for artificial even-grained sandy roughness. The pipe-lines, which are used for water-supply in practice, have natural technical coarseness. The coarseness has different structure: it can have corrugated or saw-tooth surfaces and there can be also protective coat.

The comparative analysis is provided for different methods of hydraulic losses calculations for head losses in pipe-lines for ringed water net. Recommendations for usage are also presented.

Keywords: *pipe-line, head, water-supply, corrugated surface, calculation, hydraulic loss.*

Кольцевые водопроводные сети включают в себя замкнутые смежные кольца или контуры. Они обладают большей надежностью при эксплуатации, чем разветвленные сети.

Расчет кольцевых водопроводных сетей при проектировании представляет сложную задачу. При ее решении учитываются не только трубопроводы, но и все гидравлические сооружения: насосные станции, станции подкачки, резервуары, водонапорные башни, клапаны, задвижки и др.

Методика увязки кольцевой водопроводной сети и установление давлений или свободного напора в узлах как за рубежом, так и в России практически идентичны, однако каждая из них имеет свои особенности.

При расчете кольцевой сети должны выполняться два условия, аналогичные расчету электрических, тепловых цепей (электро-, гидро-, тепловая аналогия) – законы Кирхгофа. Первый из них свидетельствует о том, что алгебраическая сумма расходов в узлах кольцевой водопроводной сети равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n Q_{\text{узн.}i} = 0, \quad (1)$$

то есть приток жидкости к узлу сети равен оттоку от него.

Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма гидравлических потерь при обходе кольца равна нулю согласно принципу параллельно соединенных трубопроводов.

В водоснабжении за положительные потери принимают гидравлические сопротивления на участках кольца, где движение воды совпадает с направлением часовой стрелки:

$$\sum_{i=1}^n h_k = 0. \quad (2)$$

Задача расчета кольцевой сети сводится к распределению расходов по участкам и назначению их диаметров таким образом, чтобы выполнялось условие (2).

Расчет выполняется методом последовательных приближений. Удовлетворить условию (2) достаточно сложно, поэтому количество приближений ограничивают погрешностью расчета – невязкой кольца. Несоответствие нулю условия (2) называют **невязкой кольца**. В водоснабжении при расчете многокольцевых сетей за допустимую невязку принимают $\Delta h_k = 0,5$ м.

Основные этапы расчета кольцевой сети: 1) задают направление движения воды на участках колец и распределяют расходы согласно условию (1); 2) определяют экономические диаметры из справочных таблиц в соответствии с заданными расходами; 3) рассчитывают гидравлические потери на участках колец и определяют их невязки. Если невязка больше допустимой, то приступают к следующим попыткам расчета.

При этом перераспределяют расходы по участкам, соблюдая условие (1), меняют диаметры трубопроводов участков с целью приравнивания «отрицательных» и «положительных» потерь. Расчет продолжают до тех пор, пока невязки колец будут меньше или равны допустимым значениям ($\Delta h_k \leq 0,5$ м). Однако существуют и другие способы устранения невязки подбором коэффициентов относительной шероховатости; корректировкой показателей аппроксимирующей функции, которые учитывают влияние изменяющихся коэффициентов шероховатости.

В этом случае особую значимость приобретает использование отечественных и зарубежных методик на основе стандартных машинных программ на ПК, их сопоставление, а также анализ заложенного в них инструментария (физических и математиче-

ских моделей), учет факторов, описывающих гидравлические явления при движении потоков воды в трубах кольцевой сети, экспериментальные модели конструктивно-технологических особенностей монтажа и эксплуатации сетей, разнообразие режимов (циклограмм) расходов, внедрение энергосберегающих технологий, связанных с применением внутренней штукатурки (защитных покрытий) и др.

Общая формула для потерь напора по длине трубопровода (или канала) при установившемся равномерном движении жидкости имеет вид

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{\ell}{4R} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (3)$$

а для круглых труб

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (4)$$

где $d = 4R$ и ℓ – внутренний диаметр и длина трубы;

$R = \frac{\omega}{\partial \ell}$ – гидравлический радиус;

$\omega = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь живого сечения трубы;

$\partial \ell$ – смоченный периметр; λ – коэффициент сопротивления трения (коэффициент Дарси).

Эта формула установлена экспериментально. Ее называют формулой Дарси-Вейсбаха.

При равномерном движении жидкости средняя скорость потока, согласно этой формуле, находится так:

$$V = \sqrt{\frac{8gR}{\lambda} \cdot \frac{h_{\text{дл}}}{\ell}}. \quad (5)$$

Используя общепринятое обозначение

$\sqrt{\frac{8g}{\lambda}} = C$ (коэффициент Шези), видно, что средняя

скорость потока, а в конечном итоге потери напора по длине, определяются геометрическими параметрами канала, его шероховатостью и зависят от режима движения. Некоторые исследователи считают, что природа сопротивлений открытых каналов и трубопроводов одинакова. Поэтому по формуле Шези рассчитывают и гидравлические потери в трубопроводах. Но шероховатость водотоков (труб, открытых каналов и т.д.) может быть весьма различной.

Обычно равнотерную (песчаную) шероховатость используют только в лабораторных условиях. Поверхность же труб и открытых водотоков обычно неравнотерная (разновысокая и неравномерно расположенная шероховатость). Она мо-

жет быть волнистой с различными высотами и длинами волн (или микроволн). Это повышает поверхностное трение, обусловленное обтеканием бугорков шероховатости.

Из соотношения (5) получим формулу Шези для средней скорости при равномерном движении:

$$V = C \cdot \sqrt{Ri}, \quad (6)$$

где $i = \frac{h_{\text{дл}}}{\ell}$ – гидравлический уклон.

При равномерном движении гидравлический уклон равен пьезометрическому $i = J$.

Расход, найденный по формуле Шези при равномерном движении, определяется следующим образом:

$$Q = \omega \cdot V = \omega \cdot C \cdot \sqrt{Ri}. \quad (7)$$

Перепишем формулу Шези в ином виде:

$$V = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \cdot \sqrt{gRi}, \quad (8)$$

где $\sqrt{gRi} = U_*$ – динамическая скорость.

Тогда, учитывая преобразования,

$$\frac{V}{\sqrt{gRi}} = \frac{V}{U_*} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}},$$

коэффициент Дарси примет вид

$$\lambda = 8 \cdot \left(\frac{U_*}{V} \right)^2. \quad (9)$$

Следует учесть, что динамическая скорость для каждого конкретного случая установившегося равномерного движения жидкостей сохраняется постоянной.

Касательное напряжение на стенке трубопровода составляет

$$\tau_0 = \rho g Ri \text{ или } \frac{\tau_0}{\rho} = g Ri = U_*^2; U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}},$$

а потери напора по длине трубопровода равны

$$h_{\text{дл}} = \frac{\tau_0 \ell}{\rho g R}. \quad (10)$$

Таким образом, при равномерном движении потери напора по длине трубопровода в данных условиях (ℓ , ρ , g , R) определяются через касательные напряжения на стенке. Динамическая скорость U_* позволяет найти различные выражения для относительных дефицитов скорости в трубопроводах.

Первую формулу для коэффициента Шези в квадратичной области сопротивлений предложил Маннинг (1890 г.):

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6}. \quad (11)$$

Однако наибольшее распространение в водоснабжении получила формула академика Н.Н. Павловского (1925 г.) в диапазоне $0,1 \leq R \leq 3$ м:

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (12)$$

где $y = 1,3 \cdot \sqrt{n}$ при $R > 1$ м; $y = 1,5 \cdot \sqrt{n}$ при $R < 1$ м; n – коэффициент шероховатости.

Ф.А. Шевелев [4] в расчетах опирался на так называемую расходную характеристику трубопровода:

$$K = \omega C \cdot \sqrt{R}, \text{ м}^3/\text{с или л/с}. \quad (13)$$

Характеристика K представляет собой расход в трубопроводе при гидравлическом уклоне $i = 1$. В этом случае формула для определения расхода имеет вид

$$Q = K \cdot \sqrt{i}, \quad (14)$$

а потери напора по длине находят так:

$$H = h_{\text{дл}} = \frac{Q^2 \ell}{K^2}. \quad (15)$$

Тогда при $\frac{C}{C_{\text{кв}}} = \sqrt{\frac{\lambda_{\text{кв}}}{\lambda}}$ имеем $\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кв}}} = \frac{1}{\Theta_1^2}$, а

коэффициент $\Theta_2 = \frac{1}{\Theta_1^2}$.

Так как $K = \omega C \cdot \sqrt{R}$, а $K_{\text{кв}} = \omega C_{\text{кв}} \cdot \sqrt{R}$, то $K = \Theta_1 \cdot K_{\text{кв}}$, где $K_{\text{кв}}$ – расходная характеристика в квадратичной области сопротивления. Здесь K – расходная характеристика в любой, в том числе и в переходной (доквадратичной) области сопротивления. Отсюда расход и напор жидкости определяются по формулам:

$$Q = \Theta_1 \cdot K_{\text{кв}} \cdot \sqrt{i}, \quad (16)$$

$$H = \frac{\Theta_2 \cdot Q^2 \cdot \ell}{K_{\text{кв}}^2}. \quad (17)$$

В квадратичной области сопротивления имеем $\Theta_1 = \Theta_2 = 1$, а в переходной (доквадратичной) – $\Theta_1 < 1$, $\Theta_2 > 1$.

Для вычисления напора используем формулу

$$H = A \ell Q^2, \quad (18)$$

где $A = \frac{1}{K^2} = \frac{1}{\omega^2 C^2 R}$ – удельное сопротивление

трубопровода, которое численно равно напору, затрагиваемому на единицу длины трубопровода при расходе $Q = 1$. Легко получить следующее:

$$A = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5} = 0,0827 \cdot \frac{\lambda}{d^5}. \quad (19)$$

По модифицированным зависимостям решаются основные задачи при расчете трубопроводов кольцевой сети. Неновые стальные и чугунные трубы (или «нормальные трубы») имеют повышенную техническую шероховатость. Она оценивается в среднем высотой выступа условной равнозернистой (или «эквивалентной») шероховатости $K \approx 1,0 \div 1,6$ мм. Новые чугунные трубы характеризуются средним значением $K \approx 0,5$ мм, новые стальные трубы – 0,45 мм. Но при защитных покрытиях («штукатурках») новых труб (битумизация и т.п.) шероховатость трубы будет существенно иной (табл. 1).

При турбулентном режиме движения воды в трубопроводах кольцевой сети отношение коэффициента Шези $C_{\text{кв}}$ в квадратичной области к коэффициенту в переходной области $\Theta_1 = C/C_{\text{кв}}$ по Ф.А. Шевелеву для каждого вида труб зависит только от средней скорости (при условии, если кинематическая вязкость жидкости $\nu = \text{const}$).

Ценность исследований течения в чугунных трубах, выполненных Ф.А. Шевелевым [4], заключается в том, что одновременно с нахождением коэффициента сопротивления λ были измерены и профили скоростей. Выявлены особенности таких течений: кривая коэффициентов сопротивления $\lambda = f(\text{Re})$, соответствующая режимам гидравлически гладкой стенки, проходит значительно выше аналогичной кривой для труб, гладких стальных и с равнозернистой шероховатостью. В чугунных трубах ярко проявляется эффект волнистости шероховатой поверхности на увеличение гидравлических потерь напора.

Согласно [4], при значении кинематического коэффициента вязкости $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, при температуре воды 10 °С, для новых стальных труб

$$\lambda = \frac{0,0159}{d_p^{0,226}} \cdot \left(1 + \frac{0,684}{\nu}\right)^{0,226}, \quad (20)$$

для новых чугунных труб

$$\lambda = \frac{0,0144}{d_p^{0,284}} \cdot \left(1 + \frac{2,36}{\nu}\right)^{0,284}. \quad (21)$$

Для новых стальных и чугунных водопроводных труб

$$\text{при } \frac{\nu}{v} \geq 9,2 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{м}} \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{0,021}{d_p^{0,3}};$$

$$\text{при } \frac{\nu}{v} < 9,2 \cdot 10^5 \frac{1}{\text{м}}$$

$$\lambda = \frac{1}{d_p^{0,3}} \cdot \left(1,5 \cdot 10^{-6} + \frac{\nu}{v}\right)^{0,3}; \quad (23)$$

или, приняв $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, имеем

$$\lambda = \frac{0,0179}{d_p^{0,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3}. \quad (23a)$$

Подстановка в формулу (4) значений λ , определяемых выражением (23) и (23a), дает следующие расчетные формулы для гидравлического уклона неновых стальных и чугунных водопроводных труб: при $v \geq 1,2$ м/с

$$i = 0,00107 \cdot \frac{v^2}{d_p^{1,3}}, \quad (24)$$

при $v < 1,2$ м/с

$$i = 0,000912 \cdot \frac{v^2}{d_p^{1,3}} \cdot \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3}. \quad (25)$$

Величина потерь напора может быть подсчитана с помощью удельного сопротивления трубопровода, которое в соответствии с формулой (25) определяется как

$$A = \frac{i}{Q^2} = \frac{0,001735}{d_p^{5,3}}. \quad (26)$$

Формула (26) справедлива при $v \geq 1,2$ м/с, при меньших скоростях движения воды величина A должна быть умножена на поправочный коэффициент $\Theta_1 > 1,0$ с учетом неквадратичной зависимости потерь напора от средней скорости движения воды при $v < 1,2$ м/с.

Новые стальные и чугунные водопроводные трубы при обычных скоростях движения воды работают в переходной области, то же самое относится к асбестоцементным и железобетонным трубам.

Ф.А. Шевелевым при $V = 1$ м/с предложены формулы для определения удельных сопротивлений:

для асбестоцементных труб

$$A' = \frac{0,001212}{d^{5,19}}; \quad (27)$$

для пластмассовых труб (из полиэтилена и винилпласта)

$$A' = \frac{0,00111}{d^{5,226}}; \quad (28)$$

для железобетонных труб

$$A' = \frac{0,001751}{d^{5,19}}. \quad (29)$$

Таблица 1

№ п/п	Вид труб	1000 К	р	п
1	Новые стальные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	1,790	5,1	1,9
2	Новые чугунные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	1,790	5,1	1,9
3	Неновые стальные и неновые чугунные без внутреннего защитного покрытия или с битумным защитным покрытием	1,735	5,3	2
4	Асбестоцементные	1,180	4,89	1,85
5	Железобетонные виброгидропрессованные	1,688	4,89	1,85
6	Железобетонные центрифугированные	1,486	4,89	1,85
7	Стальные и чугунные с внутренним пластмассовым или полимерцементным покрытием, нанесенным методом центрифугирования	1,180	4,89	1,85
8	Стальные и чугунные с внутренним цементно-песчаным покрытием, нанесенным методом набрызга с последующим заглаживанием	1,688	4,89	1,85
9	Стальные и чугунные с внутренним цементно-песчаным покрытием, нанесенным методом центрифугирования	1,486	4,89	1,85
10	Пластмассовые	1,052	4,774	1,774
11	Стеклянные	1,144	4,774	1,774

Используется следующий прием для определения потерь напора в этих трубах по формуле $h = A l q^2$: рассчитывается величина удельного сопротивления A при скорости движения в них $v = 1,0$ м/с, а при всех других значениях скорости $v \neq 1,0$ м/с вводятся поправочные коэффициенты.

Аналогичный прием используется для определения потерь напора в пластмассовых трубах, которые в водопроводной практике работают в области гидравлически гладких труб.

В СНиПе [1] при выполнении технико-экономических и гидравлических расчетов систем подачи и распределения воды на компьютерах потери напора в трубах рекомендуется определять по формуле

$$i = \frac{K q^n}{d^p}, \quad (30)$$

где q – расчетный расход воды, л/с; d – расчетный внутренний диаметр трубы, м.

Значения коэффициента K и показателей степени n и p следует принимать согласно табл. 1, исходя из штукатурки внутренней поверхности трубы.

Из табл. 1 нами выделены три группы труб по гидравлическим сопротивлениям:

гр. I – № п/п 1, 2, 3, где $p = 5,1 \div 5,3$, $n = 1,9 \div 2,0$;
гр. II – № п/п 4, 5, 6, 7, 8, 9, где $p = 4,89$, $n = 1,85$;
гр. III – № п/п 10, 11, где $p = 4,774$, $n = 1,774$.

Как следует из зависимости для гидравлического уклона (30), наименьшими потерями обладают гидравлически гладкие пластмассовые и стеклянные трубы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Нормы проектирования [Текст]. – М., 1985.
2. Хаммер, М. Технология обработки природных и сточных вод [Текст] / М. Хаммер. – М.: Стройиздат, 1979.
3. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация [Текст] / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. – М.: Стройиздат, 2000.
4. Шевелев, Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах [Текст] / Ф.А. Шевелев. – М.: Госстройиздат, 1953.

© Гальперин Е.М., Лукс А.Л.,
Крестин Е.А., 2012