

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБАХ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF RUSSIAN AND FOREIGN METHODS FOR CALCULATIONS
OF PIPE-LINES HEAD LOSSES IN RINGED WATER NET

Проанализированы различные методики расчета потерь напора в трубах кольцевой водопроводной сети. Выявлены особенности применения машинных программ, позволяющих выполнять гидравлические расчеты системы подачи и распределения воды в кольцевой сети. Сформулированы рекомендации по снижению потерь напора в инженерных сетях.

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

Анализ различных методик расчета гидравлических сопротивлений труб при проектировании кольцевой водопроводной сети имеет практический интерес с точки зрения энергосбережения [1-6].

Формула Дарси-Вейсбаха [1] по утверждению М. Хаммера [2] за рубежом редко применяется при проектировании и расчете водораспределительных систем, поскольку пользоваться ею неудобно. Диаметр трубопровода приходится определять методом итераций, так как коэффициент гидравлического трения зависит от относительной шероховатости, которая в свою очередь зависит от диаметра трубы.

При проектировании и расчете водораспределительных систем для наиболее широко применяемых труб обычно пользуются формулой Хазена-Вильямса [2] вида

This paper discusses different methods for calculations of pipe-lines head losses in ringed water net. Features of computer programs usage for hydraulic calculations of water supply and distribution in ringed water net. Recommendations for decreasing of head losses for engineering water nets.

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

$$v = 0,849 \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot i^{0,54}, \quad (1)$$

где v – скорость, м/с; C – коэффициент трения, зависящий от материала и состояния стенок труб (табл. 2); R – гидравлический радиус, м; i – гидравлический уклон потока, м/м.

Эта полуэмпирическая формула связывает среднюю скорость турбулентного потока воды при равномерном движении с гидравлическим радиусом, гидравлическим уклоном потока и коэффициентом трения, зависящим от шероховатости трубы.

Используя уравнение неразрывности потока $Q = v \cdot \omega$, в котором Q – объемный расход воды, протекающей со скоростью v через живое сечение $\omega = \frac{\pi d^2}{4}$, получим полуэмпирическую формулу Хазена-Вильямса для определения расхода в круглых трубах при полном их заполнении:

$$Q = 0,278 \cdot C \cdot d^{2,63} \cdot i^{0,54}. \quad (2)$$

В программах для гидравлического расчета напорных трубопроводов фирмы Bentley используется формула Хазена-Вильямса вида

$$Q = k \cdot C \cdot \omega \cdot R^{0,63} \cdot i^{0,54} \text{ или } v = k \cdot C \cdot R^{0,63} \cdot i^{0,54},$$

где C – коэффициент шероховатости Хазен-Вильямса (безразмерный); k – константа (0,85 для единиц в системе СИ и 1,32 – в системе US).

Очевидно, эта формула имеет такую же структуру, как формула Шези, $v = R^{0,5} \cdot i^{0,5} \cdot C$, но с несколько измененными показателями степени.

Из анализа размерностей правых частей вышеуказанных формул следует, что формулы Хазен-Вильямса для объемного расхода и средней скорости потока воды становятся «неправильными». Они дают только численную величину параметров.

По первоначально установленным фирмой Bentley единицам измерения коэффициент трения λ (Swamee and Jain Equation) равен

$$\lambda = \frac{1,325}{\ln\left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right)^2}, \quad (3)$$

где ε – величина абсолютной шероховатости, м, фут; D – диаметр трубы, м, фут; Re – число Рейнольдса.

В пояснениях к программам фирмы Bentley содержится утверждение, что при использовании уравнения Дарси-Вейсбаха необходим итерационный процесс выбора коэффициента шероховатости до тех пор, пока вычисленный расход не будет соответствовать выбранному коэффициенту шероховатости, так как в правой и левой части уравнения содержится скорость.

В программе фирмы Bentley трубу характеризуют следующие параметры: 1) объемный расход; 2) диаметр; 3) состояние (с установленным обратным клапаном); 4) год укладки; 5) длина; 6) материал; 7) коэффициент потери напора на местные сопротивления; 8) шероховатость; 9) степень влияния стенки трубы.

Фирмой представлена программа, позволяющая выполнять гидравлические расчеты системы подачи и распределения воды – Eranet 2.0 [3]. Эта программа выпущена Агентством США по защите окружающей среды, которое является центром по исследованию технологических и управленческих подходов с целью уменьшения рисков угрозы здо-

ровья человеку и окружающей среде. Эта программа разработана подразделением водных ресурсов и водоснабжения национальной исследовательской лаборатории управления рисками. Программа выпущена в сентябре 2000 г. и сопровождается информацией об отказе прав на нее.

В Eranet 2.0 основные исходные гидравлические параметры для труб: начальный и конечный узел; диаметр; длина; коэффициент шероховатости (для определения потерь напора); состояние (открытая, закрытая или с регулирующим клапаном).

В табл. 1 нами обобщены данные о параметрах, характеризующих шероховатость труб, из разных литературных источников.

Программа Eranet 2.0 [3] предлагает в качестве вариантов при определении потерь напора использовать формулы Дарси-Вейсбаха или Хазен-Вильямса, в первом случае для трубы задается шероховатость в абсолютной величине, в миллиметрах, во втором случае должна быть задана величина C . Был выполнен гидравлический расчет водопроводной сети, изображенной на рис. 1, по программе Eranet 2.0 с использованием для определения потерь напора в трубах формулы Хазена-Вильямса ($C = 100$), формулы Дарси-Вейсбаха и выражения $h = A l q^2$, где A – удельное гидравлическое сопротивление для новых чугунных труб было взято из [5]. Последний расчет выполнен по программе гидравлического расчета, используемой кафедрой водоснабжения и водоотведения Самарского государственного архитектурно-строительного университета.

Работа водопроводной сети была задана следующим образом: насосная станция была выключена, в узел 10 (узел 13 в схеме Eranet 2.0) подавался сосредоточенный расход $0,698 \text{ м}^3/\text{с}$, водонапорная башня функционировала и располагалась на отметке 117 м, расход воды из нее составил $0,125 \text{ м}^3/\text{с}$.

Сравнение результатов гидравлического расчета водопроводной сети (рис. 1) по программе Eranet 2.0 приведено в табл. 2. В графе 5 табл. 2 содержится отношение потерь напора, определенных по формуле Хазен-Вильямса с использованием программы Eranet 2.0 к потерям напора, определенным по формуле $h = A l q^2$ с использованием справочного материала [5], а в графе 6 табл. 2 отношение потерь напора по формуле Хазен-Вильямса к потерям напора по уравнению Дарси-Вейсбаха, вычисленные с помощью программы Eranet 2.0. Из

Таблица 1

Материал	Типовые величины шероховатости для напорных труб для программ фирмы Bentley			Рекомендуемые значения эквивалентной шероховатости K_s^* , мм, для труб из различных материалов (табл. 1.2 [3])	Значение коэффициента C в формуле Хазена-Вильямса [2]	Коэффициенты шероховатости для новых труб, принятые в Epanet для формул		
	Коэффициент Маннинга n	Коэффициент Хазена-Вильямса C	Коэффициент Дарси-Вейсбаха k , мм			Хазен-Вильямса	Дарси-Вейсбаха, фут $\times 10^{-3}$	
Асбестоцемент	0,011	140	0,0015	Новые 0,05–0,1 экспл. в ср. усл. 0,6	140	—	—	
Латунь	0,011	135	0,0015	—	—	—	—	
Кирпич	0,015	100	0,6	—	—	—	—	
Трубы чугунные	новые	0,012	130	0,26	0,25–0,1	130	130–140	0,85
	после 5 лет	—	—	—	—	120	—	—
	после 20 лет	—	—	—	—	100	—	—
	с внутренней песчано-цементной оболочкой	—	—	—	—	130–150	—	—
Бетон (ж/б)	—	—	—	—	130	120–140	1-10	
Изготовленный	в стальной форме	0,011	140	0,18	Эксплуатируемые в средних условиях 2,5	—	—	—
	в деревянной форме	0,015	120	0,6		—	—	—
	центрофигурованный	0,013	135	0,36		—	—	—
Медь	0,011	135	0,0015	—	130–140	—	—	
Рифленый гофрированный металл	0,022	—	45	—	—	—	—	
Оцинкованное железо	0,016	120	0,15	—	—	120	0,5	
Стекло	0,011	140	0,0015	—	—	—	—	
Свинец	0,011	135	0,0015	—	—	—	—	
Пластик	0,009	150	0,0015	—	140–150	140–150	0,005	
Сталь	каменноугольная эмаль, покрытие	0,010	148	0,0048	Битомизируемые до 0,04	—	—	—
	новая, без покрытия	0,011	145	0,045	Цельнотянутые 0,02–0,1 Цельносварные 0,04–0,1	120	140–150	0,15
	клепаная	0,019	110	0,9	0,04–0,1	110	—	—
Деревянная футеровка планками	0,012	120	0,18	—	—	—	—	

* Величина K_s – это эквивалентная шероховатость, равная диаметру фракции песка, при устройстве из которого искусственной равномерной шероховатости сопротивление трубопровода равняется сопротивлению трубопровода с естественной шероховатостью.

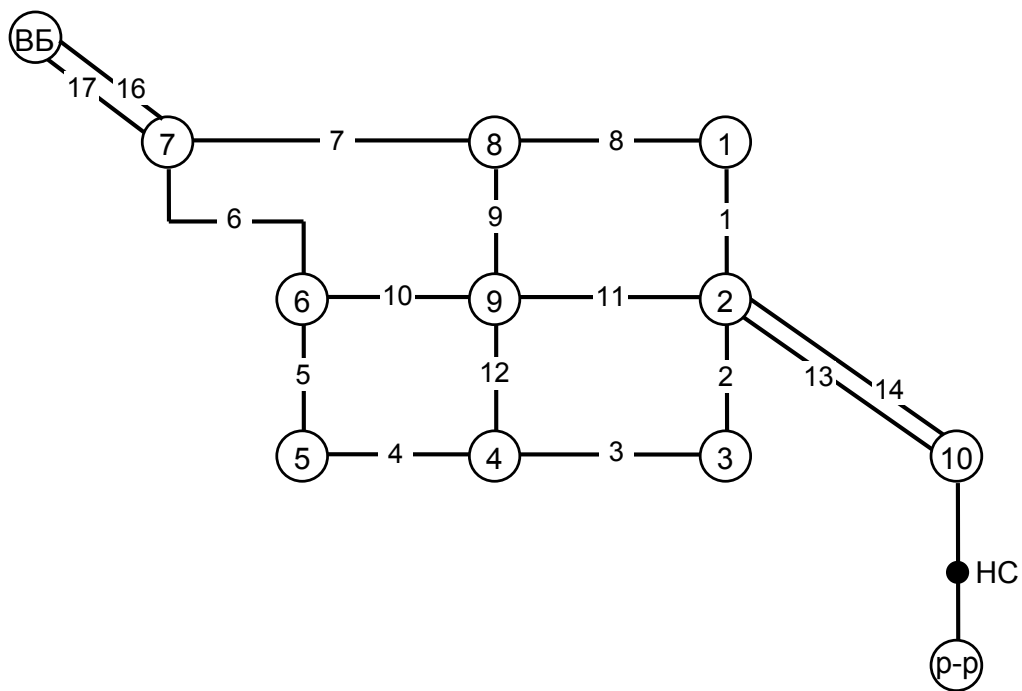


Рис. 1

Таблица 2

Номера участков	Потери напора на участке, м			(2)/(3)	(2)/(4)	v, м/с
	Хазена-Вильямса	Шевелева	Дарси-Вейсбаха			
1	2	3	4	5	6	7
1/1-2	5,46	4,89	4,27	1,12	1,28	1,07
2/2-3	2,46	2,27	1,97	1,08	1,25	1,46
3/3-4	4,76	4,15	3,65	1,07	1,30	1,05
4/4-5	7,87	7,14	6,44	1,10	1,22	1,09
5/6-5	2,32	2,02	1,84	1,15	1,26	0,82
6/7-6	7,83	7,02	6,35	1,11	1,23	1,01
7/7-8	1,46	1,13	1,05	1,29	1,39	0,37
8/1-8	0,94	0,77	0,69	1,22	1,36	0,54
9/8-9	0,75	0,55	0,52	1,36	1,44	0,38
10/9-6	7,12	6,43	5,82	1,11	1,22	1,04
11/2-9	5,65	5,11	4,44	1,11	1,27	1,34
12/9-4	1,57	1,31	1,22	1,20	1,29	0,68
14, 13/13-2; 10-2	7,23	6,34	5,52	1,14	1,31	1,23
16, 17/10-7	1,09	0,93	0,86	1,17	1,27	0,88

табл. 2 следует, что максимальная величина потерь напора имеет место при использовании формулы Хазена-Вильямса, в среднем на 16 % по сравнению с формулами Ф.А. Шевелева и на 29 % по сравнению с выражением Дарси-Вейсбаха.

В программе для гидравлического расчета напорных трубопроводов фирмы Bentley заложен год укладки трубопроводов, бывших длительное время в эксплуатации. Поэтому трубопроводы обладают более повышенным гидравлическим сопротивлением, чем по остальным методикам расчета (Шевелева и Дарси-Вейсбаха).

В настоящее время моделирование существующей водопроводной сети предполагает идентификацию ее с реальным объектом, в ходе которого корректируются параметры модели, в том числе и гидравлические сопротивления участков кольцевой сети. В реальной жизни в России наблюдается значительное использование зарубежных программ для гидравлических расчетов водопроводной сети. В связи с этим возникла задача, наряду с работами Шевелева и других отечественных исследователей, знакомить российских инженеров с практикой гидравлических расчетов за рубежом и используемых методик расчетов с целью их анализа и сопоставления.

Из опытов Никурадзе следует, что при больших числах Рейнольдса средняя высота выступов равнозернистой шероховатости \bar{K} является надежной характеристикой, определяющей уровень автоматического режима. При этом в качестве характеристического размера течения принимаем высоту выступов шероховатости \bar{K} , а в качестве масштаба пульсационной скорости – величину динамической скорости U_* .

Однако с уменьшением чисел Рейнольдса в одних случаях переход к режиму гладких труб наступает довольно быстро, а в других (особенно в технически гладких трубах) переход оказывается сильно затянутым.

По-видимому, здесь играют роль не только средние значения размеров выступов неравномерной шероховатости, но и их дисперсия, т.е. среднеквадратичные отклонения от среднего, а также закон распределения выступов в трубах. Если дисперсия невелика, переход от режима шероховатости к режиму гладких труб наступает резко. В случае большой дисперсии этот переход наступает постепенно, так как с ростом толщины пристеночного слоя вы-

ступы утопают в толще ламинарного слоя неодновременно.

Идею о существовании волновых движений жидкости в пристеночных слоях выдвинули академики П.Л. Капица и М.Д. Миллионщиков [6].

Для описания течения и волнисто-шероховатых поверхностей в трубах продуктивной является более сложная двухслойная модель пристеночного турбулентного движения (турбулентное ядро с логарифмическим распределением осредненных по сечению скоростей и особый пристенный слой с линейным распределением скоростей).

Размер элемента шероховатой поверхности может быть принят равным длине волны, а для обеспечения достаточной надежности осреднения по площади за элемент шероховатости следует принимать участок, который включает по длине 5-8 отдельных выступов.

В опытах Никурадзе, где искусственная песчаная шероховатость была практически однородной, дисперсия меньше ($\bar{\sigma}/\bar{K} \approx 0,23 \pm 0,3$), чем в технически гладких промышленных трубах ($\bar{\sigma}/\bar{K} \approx 1,5$).

При малых значениях дисперсии асимптотическое поведение коэффициента сопротивления λ определяется только значением средней высоты выступов шероховатости \bar{K} и не зависит от $\bar{\sigma}$. При больших значениях $\bar{\sigma}$ (включая $\bar{\sigma}/\bar{K} \approx 1,5$) асимптотическое поведение коэффициента Дарси λ зависит не только от \bar{K} , но и от $\bar{\sigma}$. Выявлено, что асимптотическое поведение определяется большим значением эффективной шероховатости, чем то, которое соответствует однородной равнозернистой шероховатости. Это частично объясняет обнаруженное в экспериментах явление значительно большего сопротивления применяемых в водоснабжении труб по сравнению с трубами с однородной равнозернистой шероховатостью. Следовательно, при расчете кольцевой водопроводной сети выявляется необходимость применять более общие законы распределения шероховатостей в трубах, в том числе обладающих волнистой шероховатостью.

Машинные программы расчет потерь напора, в отличие от экспериментальных исследований Ф.А. Шевелева [4, 5] труб с технической шероховатостью, не учитывают влияние волнистости обтекаемой шероховатой поверхности на увеличение коэффициента сопротивления λ (или коэффициента Шези C), как и особенности монтажа и укладки трубопрово-

дов в сети, как отмечал Г. Шлихтинг в 1956 г., изучая пристенные течения. При многолетней эксплуатации в водопроводных трубах образуются волнистые отложения с перпендикулярным потоку фронтом волн высотой 0,5 мм при диаметре труб 500 мм. Они снижают расход воды более чем на 50%! Только увеличением относительной шероховатости стенки этот эффект объяснить невозможно. Внутренняя поверхность в чугунных трубах также относится к волнисто-шероховатым. Особенность турбулентных течений над волнисто-шероховатыми поверхностями в трубах, по-видимому, связаны с неравномерностью движения, т.е. наличием участков локального ускорения и замедления движения в пристенных слоях. Отсюда вытекает практическая значимость результатов проведенного сопоставительного анализа различных методик расчета потерь напора в трубопроводах кольцевой водопроводной сети и уточнение границ их работоспособности, которые опираются на комплексные экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений различных труб.

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. Epanet 2.0. U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory, 2004.
4. Шевелев, Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах [Текст] / Ф.А. Шевелев. – М.: Госстройиздат, 1953.
5. Шевелев, Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справочное пособие [Текст] / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев. – 6-е изд., доп. и перераб. – М., Тверь, 2007.
6. Миллионщиков, М.Д. Турбулентные течения в пристеночном слое и в трубах [Текст] / М.Д. Миллионщиков // Атомная энергия. – 1970. – Т. 28, вып. 3.

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