

УДК 628.15

УЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДА С ПОПУТНЫМИ ОТБОРАМИ ПРИ НАЗНАЧЕНИИ ДИАМЕТРОВ ТРУБ

доц. С.П. СЕДЛУХА, Т.В. КОЗИЦИН
(Полоцкий государственный университет)

Произведен анализ возможности использования метода предельных расходов для определения диаметров участков трубопровода с попутными отборами. Приведены соответствующие расчеты.

Одним из самых простых, но и в то же время и одним из самых приближенных методов расчета систем распределения воды является метод подбора диаметров труб по предельным расходам. Предельные расходы определяют на основании более точных методов расчета [1 – 7] для независимо работающих трубопроводов. На практике при использовании данного метода удобно пользоваться таблицами для гидравлического расчета Ф.А. Шевелева [8], где приведены соответствующие данные.

Суть метода предельных расходов заключается в следующем. Если принять тот или иной стандарт на трубы, то для каждого из имеющегося диаметров в сортаменте можно найти такой расход, при котором данный диаметр станет экономически равноценным следующему диаметру.

При сравнении двух конкурентных вариантов с экономической точки зрения более выгодным считается вариант, обладающий минимумом дисконтируемых затрат на строительство и эксплуатацию в течение расчетного срока эксплуатации.

На рис. 1 показан график зависимости дисконтированных затрат от пропускаемого расхода для трубопроводов различного диаметра из полиэтилена ПЭ-63.

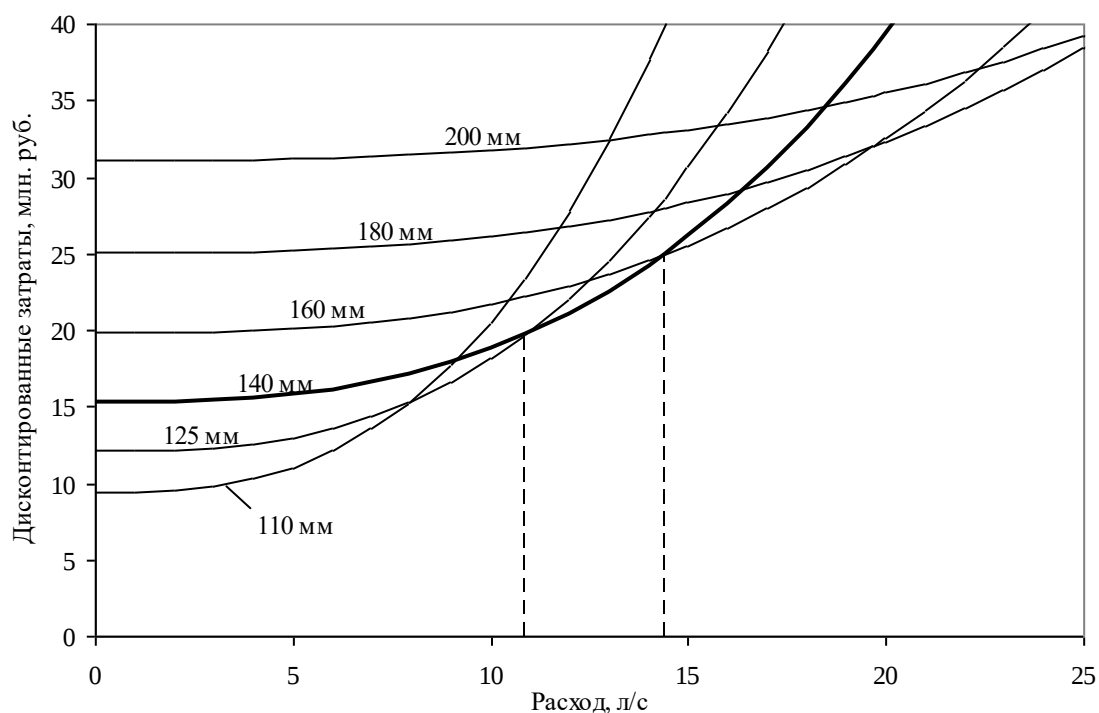


Рис. 1. Зависимость дисконтированных затрат от транспортируемого расхода для трубопроводов из полиэтилена ПЭ-63

Из графика видно, что, например, трубопровод диаметром 140 мм при расходе 13,8 л/с становится экономически равнозначным трубопроводу диаметром 160 мм, а при расходе 10,4 л/с – трубопроводу диаметром 125 мм. При этом расход 10,4 л/с является минимальным предельным расходом; при меньших расходах необходимо применять трубопровод с меньшим диаметром. Расход 13,8 л/с является для трубопровода 140 мм максимальным предельным расходом; при больших расходах экономически будет более выгодным трубопровод большего диаметра.

Рассчитаем предельные расходы для напорных трубопроводов из полиэтилена ПЭ-63 (ПНД 273-79) ГОСТ 18599-2001 на основании реальных рыночных цен на продукцию и тарифа на электроэнергию 153 руб. за кВт/ч.

В случае строительства объекта в одну очередь и постоянства эксплуатационных расходов в течение расчетного периода эксплуатации формула дисконтированных затрат имеет следующий вид:

$$ДЗ = K + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+E)^t}, \quad (1)$$

где $ДЗ$ – дисконтированные затраты на строительство и эксплуатацию объекта в течение расчетного срока, руб.; K – стоимость строительства, руб.; C – прямые годовые эксплуатационные затраты, руб.; T – расчетный срок эксплуатации, годы; E – коэффициент дисконтирования.

При экономическом сравнении двух независимых трубопроводов дисконтированные затраты на единицу длины при одноставочном тарифе на электроэнергию выразятся уравнением:

$$ДЗ = K(1 \cdot (1+E)^{-1} + R \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t}) + \frac{q \Delta h_{mp}}{102\eta} \cdot 24 \cdot 365 \gamma \sigma \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t}, \quad (2)$$

где K – сметная стоимость строительства единицы длины трубопровода диаметром d , руб./м; R – сумма годовых отчислений на ремонт и эксплуатацию, доли единицы; Δh_{mp} – потери напора, м; q – расход по трубопроводу, л/с; η – КПД насосных агрегатов, доли ед.; γ – коэффициент неравномерности расходования электроэнергии; σ – стоимость энергии, руб./(кВт·ч).

Из определения предельных расходов, используя формулу (2), получаем следующее выражение для двух смежных диаметров i и $i+1$:

$$q = \frac{(K_{i+1} - K_i) \cdot \left(1 \cdot (1+E)^{-1} + R \cdot \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t} \right) \cdot 102\eta}{(\Delta h_i^{mp} - \Delta h_{i+1}^{mp}) \cdot 24 \cdot 365 \gamma \sigma \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t}}. \quad (3)$$

Потери напора на 1 метр (гидравлический уклон) для пластмассовых труб согласно приложению 10 [9] с учетом потерь в соединительных частях и арматуре равны:

$$i = 1,1 \cdot 0,001052 \cdot \left(\frac{q}{1000} \right)^{1,774} / d^{4,774}, \quad (4)$$

где q – расход, л/с; d – расчетный диаметр трубопровода, мм.

С учетом формулы (4) формула (3) примет вид:

$$q = \sqrt[2,774]{\frac{(K_{i+1} - K_i) \left(1 \cdot (1+E)^{-1} + R \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t} \right) \cdot 102\eta 1000^{1,774}}{1,1 \cdot 0,001052 \cdot \left(1/d^{4,774}_i - 1/d^{4,774}_{i+1} \right) \cdot 24 \cdot 365 \gamma \sigma \sum_{t=1}^{t=T} (1+E)^{-t}}}. \quad (5)$$

Продолжительность расчетного срока эксплуатации для сравнения конкурентных вариантов – 25 лет; $\gamma = 0,7$; $\eta = 0,7$.

При выполнении расчетов было сделано допущение, что затраты на земляные и прочие работы для смежных диаметров равны и поэтому не учитывались. В расчет включены только рыночная стоимость трубы и налог на добавочную стоимость в размере 18 %, а прочие затраты, зависящие от диаметра трубопровода, учтены в размере 10 % от стоимости трубы.

Результаты расчета представлены в табл. 1.

Несмотря на то, что метод предельных расходов справедлив только для независимо работающих трубопроводов, его также применяют и для определения диаметров участков распределительных систем, в том числе и трубопроводов с попутными отборами.

Таблица 1

Предельные расходы для независимо работающих трубопроводов
из труб ПЭ-63 (ПНД 273-79) ГОСТ 18599-2001 при $\gamma = 0,7$ и $\eta = 0,7$

Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Цена 1 метра погонного трубы, руб.	Предельный экономический расход, л/с
110	97,4	8661	7,57
125	110,8	11147	10,4
140	124	14048	13,8
160	141,8	18275	18,8
180	159,6	23082	25,1
200	177,2	28676	32,4
225	199,4	36219	42,8
250	221,6	44755	55,5
280	248,2	55944	74,0
315	279,2	70862	97,7
355	314,8	89510	133
400	354,6	113960	176
450	399	144211	231
500	443,4	177778	302
560	496,6	222533	403
630	558,6	282206	—

Рассмотрим, в чем состоит принципиальная разница между этими объектами.

Диаметры участков распределительных сетей определяются на основании минимума дисконтированных затрат на строительство и эксплуатацию. Эксплуатационные расходы при экономическом сравнении возможных вариантов зависят от затрат энергии насосной станцией на преодоление сил трения при движении воды по трубам.

В случае независимо работающего трубопровода (рис. 2) затраты энергии насосной станцией на преодоление сил трения зависят только от величины транспортируемого расхода и от потерь напора по участку:

$$N_{mp} = \frac{q \cdot \Delta h_{mp}}{102\eta}, \quad (6)$$

где N_{mp} – затраты энергии насосной станцией на преодоление сил трения, кВт·час; q – расход по трубопроводу, л/с; Δh_{mp} – потери напора на трубопроводе, м; η – коэффициент полезного действия насосной станции, доли единицы.

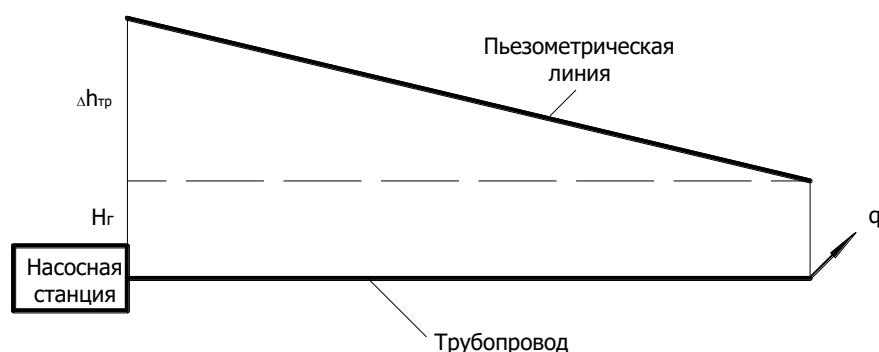


Рис. 2. Схема независимо работающего трубопровода

Теперь рассмотрим работу трубопровода с попутными отборами (рис. 3). Затраты энергии насосной станции на преодоление сил трения в этом случае зависят от подачи насосной станции и от суммы потерь напора на каждом участке:

$$N_{mp} = \frac{Q_{nc} \sum \Delta h_{mp}}{102\eta} = \frac{Q_{nc} (\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4)}{102\eta} = \frac{Q_{nc} \Delta h_1}{102\eta} + \frac{Q_{nc} \Delta h_2}{102\eta} + \frac{Q_{nc} \Delta h_3}{102\eta} + \frac{Q_{nc} \Delta h_4}{102\eta}, \quad (7)$$

где Q_{nc} – расход, подаваемый насосной станцией, л/с; $\sum \Delta h_{mp} = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4$ – сумма потерь напора на каждом участке, м.

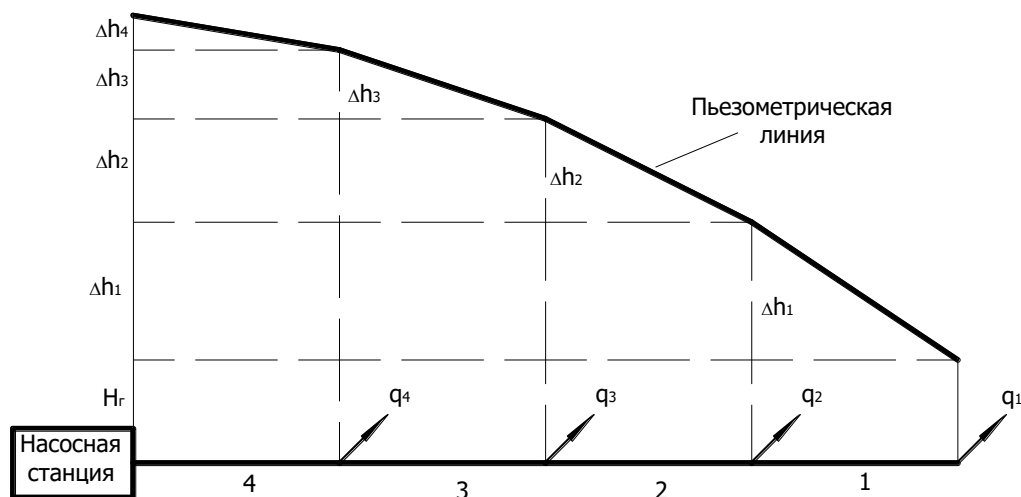


Рис. 3. Схема работы трубопровода с попутными отборами

В последнем выражении затраты энергии на преодоление сил трения представлены в виде суммы затрат энергии по всем участкам трубопровода. Из выражения (7) видно, что затраты энергии, связанные с эксплуатацией какого-либо участка трубопровода с попутными отборами, зависят от подачи насосной станции. Такие участки трубопровода называются зависимо работающими.

Сравнивая формулы (6) и (7), видим, что затраты энергии на преодоление сил трения при эксплуатации i -того участка трубопровода с попутными отборами всегда больше в Q_{nc}/q_i раз, чем при эксплуатации независимо работающего трубопровода с тем же транспортируемым расходом и с теми же потерями напора. Поскольку затраты энергии различны, то будут различными и расчетные диаметры. Поэтому метод предельных расходов для трубопровода с попутными отборами будет давать неточный результат. Докажем это.

Для анализа возьмем трубопровод с попутными отборами (табл. 2), который состоит из 10 участков. Подача насосной станции – 380 л/с. Пусть расход каждого последующего участка составляет 2/3 от предыдущего. Согласно табл. 1 назовем диаметры участков рассматриваемого трубопровода, считая их независимо работающими трубопроводами. В результате получили трубопровод, который характеризуется потерями напора (70,3 м) и стоимостью труб (900,9 млн. руб.). Чтобы доказать, что полученный вариант не оптимальный, достаточно найти такое сочетание диаметров участков трубопровода, которое будет характеризоваться меньшими капитальными затратами при сохранении таких же потерь напора (т.е. при сохранении тех же эксплуатационных затрат).

Для анализа возможности снижения затрат на строительство без увеличения эксплуатационных расходов произведем следующие расчеты. Для каждого участка трубопровода рассчитаем, как изменится величина потерь напора и стоимость трубопровода при увеличении диаметров на один сортament. Имея такие данные, мы можем оценить, как увеличатся капитальные затраты за счет уменьшения потерь напора на 1 м на каждом участке по формуле:

$$3 = \frac{K_{i+1} - K_i}{\Delta h_i^{mp} - \Delta h_{i+1}^{mp}}. \quad (8)$$

Далее, для каждого участка трубопровода рассчитаем, как изменится величина потерь напора и стоимость трубопровода при уменьшении диаметров на один сортament.

Имея такие данные, мы можем оценить, какова величина сэкономленных капитальных затрат за счет увеличения потерь напора на 1 м на каждом участке по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{K_i - K_{i+1}}{\Delta h_{i+1}^{mp} - \Delta h_i^{mp}}. \quad (9)$$

Продолжение табл. 2

Новый вариант трубопровода	Диаметр, мм Внутренний Стоимость, млн. руб. Потери напора, м/мм	500,0 443,4 198198 10,1	450,0 399,0 160776 8,1	400,0 354,6 127050 7,0	355,0 314,8 99792 6,0	315,0 279,2 79002 5,2	250,0 221,6 49896 7,6	225,0 199,4 40379 6,1	180,0 159,6 25733 8,6	160,0 141,8 20374 7,4	160,0 141,8 20374 3,6	821,6 млн. р. 69,7 м.
Увеличение диаметров трубопроводов	Диаметры на сортament больше Стоимость, тыс. руб. Потери напора, м/мм Удельная стоимость уменьшения потерь напора, млн. руб./м	496,6 248094 5,9 11,8	443,4 198198 4,9 11,6	399,0 160776 4,0 11,3	354,6 127050 3,4 10,5	314,8 99792 2,9 9,2	248,2 62370 4,4 3,9	221,6 49896 3,7 3,9	177,2 31970 5,2 1,8	159,6 25733 4,2 1,7	159,6 25733 2,0 3,5	
Уменьшение диаметров трубопроводов	Диаметры на сортament меньше Стоимость трубопровода, тыс. руб. Потери напора, м/мм Удельная экономия от увеличения потерь напора, тыс. руб./м	399,0 160776 16,7 5,7	354,6 127050 14,3 5,5	314,8 99792 12,3 5,1	279,2 79002 10,6 4,5	248,2 62370 9,1 4,3	199,4 40379 12,6 1,9	177,2 31970 10,8 1,8	141,8 20374 15,2 0,8	124,0 15662 14,0 0,7	124,0 15662 6,8 1,5	
Новый вариант трубопровода	Диаметр, мм Внутренний Стоимость, млн. руб. Потери напора, м/мм	450,0 399,0 160776 16,7	400,0 354,6 127050 14,3	355,0 314,8 99792 6,0	315,0 279,2 79002 5,2	280,0 248,2 62370 4,4	250,0 221,6 49896 3,7	200,0 177,2 31970 5,2	180,0 159,6 25733 4,2	180,0 159,6 25733 2,0	180,0 159,6 25733 2,0	780,4 млн. р. 68,7 м.
Увеличение диаметров трубопроводов	Диаметры на сортament больше Цена Потери напора, м/мм Удельная стоимость уменьшения потерь напора, млн. руб.	443,4 198198 10,1 5,7	399,0 160776 8,1 5,5	354,6 127050 4,0 11,3	314,8 99792 3,4 10,5	279,2 79002 2,9 9,2	248,2 62370 2,5 8,8	221,6 49896 2,2 8,1	186,4 40379 3,0 3,7	177,2 31970 2,6 3,8	177,2 31970 1,2 7,7	
Уменьшение диаметров трубопроводов	Диаметры на сортament меньше Цена Потери напора, м/мм Удельная экономия от увеличения потерь напора, тыс. руб.	354,6 127050 29,3 2,7	314,8 99792 25,2 2,5	279,2 79002 12,3 5,1	248,2 62370 10,6 4,5	221,6 49896 9,1 4,3	199,4 40379 7,6 3,9	186,4 40379 6,1 3,9	159,6 25733 8,6 1,8	141,8 20374 7,4 1,7	141,8 20374 3,6 3,5	

Анализируя полученные данные (см. табл. 2), видим, что увеличение диаметра на десятом участке связано с увеличением капитальных затрат на 0,7 млн. руб. на 1 м уменьшения потерь напора. В то же время на первом участке уменьшение диаметра трубопровода приведет к уменьшению капитальных затрат на 11,8 млн. руб. на 1 м увеличения потерь напора.

Таким образом увеличение диаметра трубопровода на десятом участке и уменьшение диаметров на первом участке приведет в целом к снижению капитальных затрат с 900,9 до 854,3 млн. руб., причем при снижении потерь напора (с 70,3 м до 69,7 м).

Рассчитаем удельные стоимости уменьшения потерь напора и экономии капитальных затрат от увеличения потерь напора на каждом участке для вновь полученного трубопровода.

Из таблицы 2 следует, что теперь выгоднее всего уменьшить диаметр трубопровода на втором участке, а увеличить на десятом. В результате потери напора не изменятся, а капитальные затраты уменьшатся до 821,6 млн. руб.

Действуя подобным образом можно снизить капитальные затраты с 900,8 до 789,4 млн. руб., при сохранении исходных суммарных потерь напора.

Таким образом, неучет взаимного влияния в работе участков трубопровода и назначение диаметров труб по предельным расходам привело в рассматриваемом варианте как минимум к завышению капитальных затрат на $\frac{900,8 - 789,4}{900,8} \cdot 100 = 12,4 \%$. Поэтому при расчете распределительных систем необходимо пользоваться более точными методами расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мошнин Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. – М.: Стройиздат, 1950. – 144 с.
2. Лобачев В.Г. Приемы расчета водопроводных сетей. – Л.: Изд-во МКХ РСФСР, 1950.
3. Расчет водопроводных сетей: Учеб. пособие для вузов / Н.Н. Абрамов, М.М. Поспелова и др. – изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1976. – 304 с.
4. Кирсанов М.В. Экономический расчет водопроводных сетей. – М.: Изд-во Мин-ва коммунального хозяйства РСФСР, 1949. – 146 с.
5. Теплов А.В. Определение экономических диаметров водопроводной сети из стальных и чугунных труб: Метод. пособие. – Л: ЛОЛНИИЖДТ им. ак. Образцова, 1971. – 26 с.
6. Сироткин В.П. Схемы и расчет водоводов и водопроводных сетей. – М.: Высшая школа, 1968. – 271 с.
7. Кикачейшвили Г.Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды. – Тбилиси: Сабчета Сакартвело, 1980. – 200 с.
8. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справочное пособие. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Стройиздат, 1984. – 118 с.
9. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 136 с.