

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ВСТРАИВАЕМЫХ В СЕТЬ ГОРОДСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

В.Ч. КУДАЕВ, А.К. БУЗДОВ

Институт информатики и проблем регионального управления –  
филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр  
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»  
360000, КБР, г. Нальчик, ул. И.Арманд, 37-а  
E-mail: iipru@rambler.ru

*В настоящее время за счет роста городов и плотной застройки городской территории создаются протяженные трубопроводы, встраиваемые в сеть городского водоснабжения. Существующие методы компьютерного проектирования магистральных трубопроводов (МТ) имеют общий недостаток – не представляют решения по участкам МТ в аналитической форме, т.е. в виде единой формулы, параметры которой отражают важнейшие характеристики трубопровода. В представленной работе на основе развития и формализации инженерного подхода в проектировании надежно функционирующих протяженных трубопроводов при учете затрат на его создание и эксплуатацию разработан метод аналитического решения задачи проектирования оптимального МТ. Включение инженерной практики обеспечивает «мягкую» оптимизацию без резких перепадов давления по участкам трубопровода для его надежного функционирования.*

**Ключевые слова:** система водоснабжения, протяженный трубопровод, задача оптимального проектирования, аналитическое решение, автоматизированное проектирование.

### 1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ОСНОВНОЙ ЗАДАЧИ

При постановке и решении задачи будем исходить из многолетней инженерной практики строительства и эксплуатации трубопроводов [1, с. 34-35, 47-48, 54-55], обеспечивающих его надежное функционирование. Нашей целью является включение этого подхода в оптимизацию МТ при учете заданных объективных данных. Такими данными являются напор и высотные отметки начала и конца трубопровода, длины участков МТ, величины потоков по участкам МТ.

Как известно, удельная стоимость  $i$ -го участка МТ может быть выражена эмпирической формулой [1, 2]

$$c_i = a + bd_i^\alpha, \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $a, b, \alpha$  – числовые коэффициенты;  $a > 0, b > 0, 1 < \alpha \leq 2, d_i$  – диаметр труб на  $i$ -м участке трубопровода. Для учета неразрывности и потенциальности потока (уравнений Кирхгофа) в сетях водоснабжения, пользуясь известными формулами гидравлики [1] типа Дарси-Вейсбаха для удельных потерь напора  $h_i$  при движении потока  $q_i$  по трубе диаметром  $d_i$

$$h_i = \frac{kq_i^\beta}{d_i^\gamma}, \quad \beta > 1, \quad \gamma > 4, \quad (2)$$

получим

$$c_i = a + b \left( \frac{q_i^\beta}{h_i} \right)^{\frac{\alpha}{\gamma}}. \quad (3)$$

В постановку задачи включим только соотношение, связывающее важнейшие характеристики проектируемого МТ, по которым определяются энергетические затраты на транспорт воды по МТ:

$$\sum_{i=1}^n h_i l_i = H_0 + z_0 - H_n - z_n = P_{on}.$$

Тогда задача проектирования МТ при заданном напоре воды в начале и в конце МТ имеет вид:

$$\sum_{i=1}^n \left[ a + b k^{\frac{\alpha}{\gamma}} q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} \right] l_i \rightarrow \min ,$$

где  $l_i, q_i, h_i, i = \overline{1, n}$  – заданные длины участков МТ, заданные величины потоков по участкам МТ, искомые удельные потери напора по участкам МТ;  $H_0, z_0; H_n, z_n$  – соответственно заданные напор воды и высотная отметка в начале и в конце МТ.

Поскольку  $a, b, k^{\frac{\alpha}{\gamma}}$  в целевой функции константы, то задача примет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} l_i \rightarrow \min , \\ \sum_{i=1}^n h_i l_i = P_{on} \end{cases} \quad (4), (5)$$

В задаче (4-5) следует определить  $h_i, i = \overline{1, n}$ . Задача решена методом Лагранжа [3, 4]:

$$h_r = \frac{P_{on} q_r^{\frac{\beta\alpha}{\alpha+\gamma}}}{\sum_{i=1}^n q_i^{\frac{\beta\alpha}{\alpha+\gamma}} l_i}, r = \overline{1, n}, \quad (6)$$

где  $h_r$  – удельная потеря напора по  $r$ -му участку МТ. Из (6), (2) получим

$$d_r = \frac{k^{\frac{1}{\gamma}} q_r^{\frac{\beta}{\alpha+\gamma}}}{P_{on}^{\frac{1}{\gamma}}} \left( \sum_{i=1}^n q_i^{\frac{\beta\alpha}{\alpha+\gamma}} l_i \right)^{\frac{1}{\gamma}}, r = \overline{1, n}. \quad (7)$$

Коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma, k$  в формулах (6, 7) известны для каждого вида труб [1] и представлены в таблице.

| Материал труб | Коэффициенты |         |          |          |
|---------------|--------------|---------|----------|----------|
|               | $\alpha$     | $\beta$ | $\gamma$ | $k$      |
| Сталь         | 1.4          | 2       | 5.3      | 0.001735 |
| Чугун         | 1.6          | 2       | 5.3      | 0.001735 |
| Асбестоцемент | 1.95         | 1.85    | 4.89     | 0.001180 |
| Пластмасса    | 1.95         | 1.774   | 4.774    | 0.001052 |

Используя значения этих коэффициентов в формулах (6, 7), получим

$$\begin{aligned} h_{r \text{ сталь}} &= \frac{P_{on} q_r^{0,418}}{\sum_{i=1}^n q_i^{0,418} l_i}; & d_{r \text{ сталь}} &= \frac{0,001735^{0,189}}{P_{on}^{0,189}} q_r^{0,299} \left( \sum_{i=1}^n q_i^{0,418} l_i \right)^{0,189} \\ h_{r \text{ чугун}} &= \frac{P_{on} q_r^{0,464}}{\sum_{i=1}^n q_i^{0,464} l_i}; & d_{r \text{ чугун}} &= \frac{0,001735^{0,189}}{P_{on}^{0,189}} q_r^{0,290} \left( \sum_{i=1}^n q_i^{0,464} l_i \right)^{0,189} \\ h_{r \text{ ац}} &= \frac{P_{on} q_r^{0,528}}{\sum_{i=1}^n q_i^{0,528} l_i}; & d_{r \text{ ац}} &= \frac{0,00118^{0,205}}{P_{on}^{0,205}} q_r^{0,271} \left( \sum_{i=1}^n q_i^{0,528} l_i \right)^{0,205} \\ h_{r \text{ пласт}} &= \frac{P_{on} q_r^{0,515}}{\sum_{i=1}^n q_i^{0,515} l_i}; & d_{r \text{ пласт}} &= \frac{0,001052^{0,210}}{P_{on}^{0,210}} q_r^{0,261} \left( \sum_{i=1}^n q_i^{0,515} l_i \right)^{0,210} \end{aligned} \quad (8, 9)$$

Итак, получены явные формулы для определения удельных потерь напора и диаметров труб по участкам МТ.

Для перехода на реальный сортамент труб ставим в соответствие каждому «идеальному» диаметру  $d_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , полученному из решения задачи по формулам (9), ближайший меньший и больший из заданного в базе данных (БД) разрабатываемой САПР МТ дискретного сортамента труб  $\{D_p\}$ ,  $p = \overline{1, m}$ , т.е. такие  $D_p, D_{p+1}$ , что  $D_p \leq d_i \leq D_{p+1}$ , которые обозначим  $D_i^-, D_i^+$ .

Поскольку потеря напора по участку  $i$  при формировании его из труб диаметрами  $D_i^-, D_i^+$  должна остаться прежней, то в соответствии с формулой Дарси-Вейсбаха (2) получим

$$\frac{kq_i^\beta}{D_i^{+\gamma}} x_i + \frac{kq_i^\beta}{D_i^{-\gamma}} (l_i - x_i) = h_i l_i.$$

Определив  $x_i$  из уравнения, рассчитываем стоимость труб на участках МТ

$$C_i = C_i^+ x_i + C_i^- (l_i - x_i), \quad i = \overline{1, n} \quad \text{и определяем стоимость труб всего МТ } C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Ниже в таблице 1 и на рисунке 1 представлен результат автоматизированного проектирования МТ для Северного жилого района г. Армавир без учета условия телескопичности трубопровода. В таблице указаны оптимальные («идеальные») диаметры труб и решение по участкам МТ с переходом на реальный дискретный сортамент труб из БД САПР МТ (табл. 2).

Таблица 1

| Участок | «Идеальные» диаметры | Потери напора | $D^+$ | $D^-$ | $l^+$   | $l^-$   | Стоимость (тыс. руб.) |
|---------|----------------------|---------------|-------|-------|---------|---------|-----------------------|
| 0-1     | 0,4956               | 0,075009      | 0,56  | 0,50  | 10,52   | 4,98    | 72,88                 |
| 1-2     | 0,4943               | 1,704216      | 0,56  | 0,50  | 249,65  | 104,35  | 1654,16               |
| 2-3     | 0,4930               | 2,466173      | 0,56  | 0,50  | 376,73  | 138,17  | 2391,11               |
| 3-4     | 0,4904               | 1,992934      | 0,56  | 0,50  | 331,01  | 89,49   | 1927,17               |
| 4-5     | 0,4579               | 21,10949      | 0,50  | 0,45  | 2051,47 | 3039,03 | 20451,21              |

Таблица 2

| Пластиковые водопроводные трубы |             |            |                          |  |
|---------------------------------|-------------|------------|--------------------------|--|
| Ø (мм)                          | Вес п.м./кг | Стенка, мм | Цена за п.м. с НДС (руб) |  |
|                                 | ПЭ100 SDR26 |            |                          |  |
|                                 | PN 6,3      |            |                          |  |
| 400                             | 18,6        | 15,3       | 2 790,00                 |  |
| 450                             | 23,5        | 17,2       | 3 525,00                 |  |
| 500                             | 29          | 19,1       | 4 350,00                 |  |
| 560                             | 36,3        | 21,4       | 5 445,00                 |  |
| 630                             | 46          | 24,1       | 6 900,00                 |  |

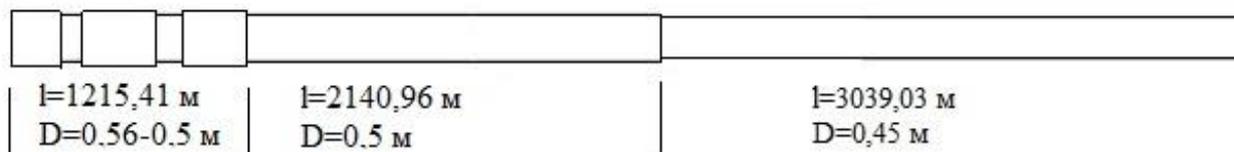


Рис. 1.

**Обеспечение телескопичности МТ.** Важной характеристикой МТ является его телескопичность – диаметры труб от начала трубопровода к концу не возрастают. Для обеспечения телескопичности трубопровода используются следующее утверждение и его следствие [3,4]:

*На двух любых смежных участках МТ либо выполнено условие телескопичности, т.е.  $D_i^- \geq D_{i+1}^+$ , либо  $D_i^+ = D_{i+1}^+$ ,  $D_i^- = D_{i+1}^-$ .*

*Если на участках  $r, \dots, s$  нарушено условие телескопичности на каждой паре смежных участков, то на всех этих участках будет выделена одна и та же пара смежных диаметров из сортамента труб, т.е.*

$$D_k^+ = D_r^+, D_k^- = D_r^-, k = \overline{r+1, s}.$$

Задача обеспечения телескопичности МТ на этой основе решается следующим образом: выделяется очередная цепочка  $r, \dots, s$  участков, на каждой смежной паре которой нарушено условие телескопичности. В соответствии со следствием из утверждения о телескопичности каждый из этих участков сформирован одной и той же парой диаметров из сортамента, которую обозначим  $D_r^+$  и  $D_r^-$ . Определим далее общую длину подучастков участков  $r, \dots, s$  МТ, которые формировались из труб большего диаметра, то есть из  $D_r^+$ :  $l_{r,s}^+ = \sum_{i=r}^s l_i^+$ . Определяем тот  $p$ -й участок, который включает концевую точку  $l_{r,s}^+$ , и осуществляем переход с большего диаметра  $D_r^+$  труб цепочки участков  $r, \dots, s$  на меньший  $D_r^-$  на  $p$ -м участке. Для этого решаем линейное уравнение

$$\sum_{i=r}^{p-1} l_i h_i^+ + x_p h_p^+ + (l_p - x_p) h_p^- + \sum_{i=p+1}^s l_i h_i^- = \sum_{i=p}^s h_i l_i,$$

где  $x_p$  – искомая часть  $p$ -го участка, укладываемая трубами диаметра  $D_r^+$ ;  $h_i^+$ ,  $h_i^-$  – удельные потери напора на  $D_i^+$ ,  $D_i^-$ ;  $h_i$  – удельная потеря напора на «идеальном» наборе труб и получаем

$$x_p = \frac{\sum_{i=p}^s h_i l_i - \sum_{i=1}^{p-1} l_i h_i^+ - l_p h_p^- - \sum_{i=p+1}^s l_i h_i^-}{h_p^+ - h_p^-}.$$

В том случае, когда  $0 \leq x_p \leq l_p$ , выбранное значение  $x_p$  верно. В противном случае следует перенести точку перехода с труб большего диаметра на трубы меньшего диаметра на  $(p-1)$ -й участок.

Ниже в наглядной форме представлен результат компьютерного проектирования МТ с соблюдением условия телескопичности.

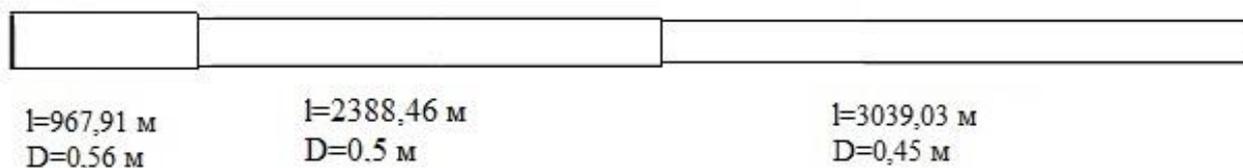


Рис. 2.

Стоимость МТ при этом составляет 26,497 млн руб.

Для сравнения ниже представлена схема МТ инженерного решения задачи:

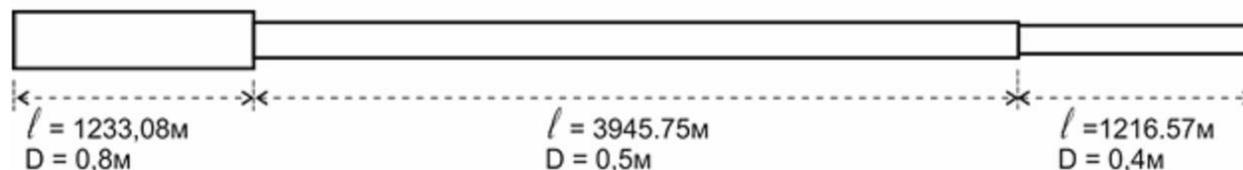


Рис. 3.

Стоимость МТ первоначального инженерного решения задачи составляла 34,264 млн руб. Таким образом, выигрыш в стоимости МТ по сравнению с инженерным решением составляет  $34,264 - 26,497 = 7,767$  (млн руб.), то есть 22,669%.

## 2. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ПОЛНОЙ ЗАДАЧИ

Для обеспечения надежного функционирования МТ и возможности его продолжения проектировщики закладывают в проект напор в конце МТ, который значительно превышает необходимый. Вследствие этого решение основной задачи обеспечивает, как правило, требуемые напоры по трассе МТ. Тем не менее следует рассчитывать и на исключительный случай, когда в городских условиях трасса МТ проходит через точки с резко отличающимися по величине высотами. В таком случае основная задача расщепляется на две связанные подзадачи, которые мы называем полной задачей.

Даже в условиях города МТ может проходить через точки с сильно отличающимися высотными отметками. В таком случае основное ограничение (5) не является достаточным, т.е. представленное решение может не обеспечить необходимую величину напора воды в некоторых точках водопотребления и, более того, поток воды может не преодолеть какие-либо из точек по трассе.

Рассмотрим поэтому полную систему ограничений:

$$H_j \geq H_0 + z_0 - H_j^0 - z_j - \sum_{i=1}^j h_i l_i \geq H_j^0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (10)$$

где  $H_j$  – напор в  $j$ -й точке трассы МТ,  $H_j^0$  – минимальный необходимый напор, который следует обеспечить в точке  $j$ .

Для того чтобы учесть полученные аналитические формулы (6, 7) решения основной задачи (4), (5), полную задачу, т.е. задачу выпуклого программирования с линейными ограничениями (5), (10), будем решать как пару связанных основных задач.

Для этого определяем по формуле (6)  $h_j$ , и  $H_j = H_0 + z_0 - H_j^0 - z_j - \sum_{i=1}^j h_i l_i$ ,  $j = \overline{1, n}$ , а затем выделяем «диктующую» точку по трассе МТ, т.е. такую точку  $k$ , для которой

$$H_k - H_k^0 = \min_{1 \leq j \leq n} \{H_j - H_j^0\}.$$

В том случае, когда эта величина отрицательна, точка  $k$  разделяет трассу МТ на две части, содержащие соответственно участки  $[1; k]$  и  $[k+1; n]$ , для каждой из которых решается основная задача:

$$\begin{cases} Z_1 = \sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} l_i \rightarrow \min, \\ \sum_{i=1}^k h_i l_i = H_0 + z_0 - H_k^0 - z_k \end{cases}, \quad \begin{cases} Z_2 = \sum_{i=k+1}^n q_i^{\frac{\beta\alpha}{\gamma}} h_i^{-\frac{\alpha}{\gamma}} l_i \rightarrow \min, \\ \sum_{i=k+1}^n h_i l_i = H_k^0 + z_k - H_n^0 - z_n \end{cases}, \quad (11),$$

$$(12)$$

Решение задачи  $Z_1$  позволяет за счет увеличения диаметров труб на первой части МТ, т.е. до диктующей точки  $k$ , обеспечить в ней минимальный необходимый напор  $H_k^0$ , а решение задачи  $Z_2$  на второй части МТ за счет уменьшения диаметров труб обеспечить заданный необходимый напор  $H_n^0$  в концевой точке МТ. При этом стоимость первой части МТ увеличивается в сравнении с решением основной задачи, стоимость второй части уменьшается, а общая стоимость МТ возрастает.

Определим, как изменятся удельные потери напора на участках первой и второй части МТ в сравнении с решением исходной основной задачи (4), (5).

Покажем, что удельные потери напора  $h_j$  на первой части трубопровода, содержащего участки  $\overline{1, k}$ , уменьшаются в одно и то же количество раз, а удельные потери напора на второй части возрастут в одно и то же количество раз относительно начального решения основной задачи.

Действительно, обозначив  $h_j^0, j=1, \dots, n$  – решение основной задачи;  $h_j^1, j=1, \dots, k$  – решение 1-й задачи,  $h_j^2, j=k+1, \dots, n$  – решение 2-й задачи, получим, в соответствии с (6):

$$\begin{aligned} \frac{h_j^1}{h_j^0} &= \frac{P_{0k} q_j^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} \sum_{i=1}^n q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i}{\sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i P_{0n} q_j^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}}} = \frac{P_{0k} q_j^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} \left( \sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i + \sum_{i=k+1}^n q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i \right)}{\sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i P_{0n} q_j^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}}} \\ &= \frac{P_{0k}}{P_{0n}} \left( 1 + \frac{\sum_{i=k+1}^n q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i}{\sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i} \right) < 1. \end{aligned}$$

Аналогично для участков второй части МТ получим:

$$\frac{h_j^2}{h_j^0} = \frac{P_{kn}}{P_{0n}} \left( 1 + \frac{\sum_{i=1}^k q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i}{\sum_{i=k+1}^n q_i^{\frac{\alpha\beta}{\alpha+\gamma}} l_i} \right) > 1.$$

Величины, стоящие в скобках формул, как видно, одинаковы, соответственно для первой и второй части МТ, т.е. для всех значений  $j = \overline{1, k}$  и  $j = \overline{k+1, n}$ , причем:

$$h_j^1 = h_j^0 \frac{P_{0k}}{P_{0n}} (1 + C), \quad h_j^2 = h_j^0 \frac{P_{kn}}{P_{0n}} \left( 1 + \frac{1}{C} \right).$$

Таким образом, недостаток напора в диктующей точке  $k$  трассы МТ компенсируется уменьшением потерь напора по участкам части трубопровода до диктующей точки пропорционально потерям напора по этим участкам в начальном решении, а получаемое при этом увеличение напора в диктующей точке компенсируется увеличением потерь напора на участках части трубопровода после диктующей точки пропорционально потерям напора по этим участкам в начальном решении.

Решив задачи (11), (12), т.е. определив значения удельных потерь и потери напора по участкам МТ, переходим к формированию проектного решения задачи на дискретном сортаменте труб с учетом условия телескопичности трубопровода.

#### Схема алгоритма решения задачи такова:

1. Формирование трассы МТ, определение длин его участков, координат контрольных точек [5].
2. Решение основной задачи.
3. Переход на реальный (дискретный) сортамент труб.
4. Обеспечение телескопичности МТ.
5. Определение «диктующей» точки по трассе МТ и дефицита напора в ней. В том случае, когда дефицит отсутствует – выдача проектной документации.
6. Расщепление задачи на две подзадачи.
7. Решение подзадач. Выдача проектной документации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе формализации и развития инженерного подхода в проектировании протяженных трубопроводов, обеспечивающего надежность его функционирования и экономическую эффективность за счет равномерного распределения давления воды по всему трубопроводу, разработан аналитический метод проектирования оптимальных МТ и получены явные формулы расчета диаметров труб и удельных потерь напора на любом участке МТ.

Решена аналитически проблема обеспечения телескопичности трубопровода в рамках решения оптимизационной задачи проектирования МТ.

Путем расщепления основной задачи проектирования МТ на две взаимосвязанные задачи основного типа решена аналитически задача проектирования МТ для случая, когда высота некоторых контрольных точек по трассе МТ превышает значительно высоту начальной и конечной точек.

Разработаны алгоритм и программа компьютерного проектирования МТ на языке VBA в виде макроса для Excel для расчета основных технико-экономических параметров магистральных трубопроводов, встраиваемых в сеть городского водоснабжения. Проведенное сравнение результатов компьютерного проектирования с реальным проектным решением показало высокую экономическую эффективность метода (~ 23% экономии от стоимости МТ).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов Н.Н. и др.* Расчет водопроводных сетей. М.: Стройиздат, 1983. С. 278.
2. *Меренков А.П. и др.* Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. Новосибирск: ВО «Наука», 1992. С. 406.
3. *Кудаев В.Ч., Багов М.А.* Математическое моделирование и рациональное проектирование магистральных трубопроводов, встраиваемых в сеть городского водоснабжения // Известия КБНЦ РАН. 2017. № 6(80). С. 36-42.
4. *Кудаев В.Ч., Буздов А.К.* Математическое моделирование и компьютерное проектирование магистральных трубопроводов, встраиваемых в сеть городского водоснабжения // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 4(24). С. 109-116.
5. *Буздов А.К., Тутов А.С.* Виртуальное прототипирование проектируемого протяженного трубопровода, встраиваемого в сеть городского водоснабжения // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 4 (90). С. 5-13.

## REFERENCES

1. Abramov N.N. et al. *Raschet vodoprovodnykh setey* [Calculation of water supply networks]. M.: Stroyizdat, 1983. P. 278.
2. Merenkov A.P. et al. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya sistem teplo-, vodo, nefte- i gazosnabzheniya* [Mathematical modeling and optimization of heat, water, oil and gas supply systems]. Novosibirsk: VO «Nauka», 1992. P. 406.
3. Kudaev V.Ch., Bagov M.A. *Matematicheskoye modelirovaniye i ratsional'noye proyektirovaniye magistral'nykh truboprovodov, vstraiwayemykh v set' gorodskogo vodosnabzheniya* [Mathematical modeling and rational design of trunk pipelines embedded in the urban water supply network] // *Izvestiya KBNTS RAN* [News of the KBSC RAS]. 2017. No. 6 (80). P. 36-42.
4. Kudaev V.Ch., Buzdov A.K. *Matematicheskoye modelirovaniye i komp'yuternoye proyektirovaniye magistral'nykh truboprovodov, vstraiwayemykh v set' gorodskogo vodosnabzheniya*

[Mathematical modeling and computer design of main pipelines embedded in the urban water supply network] // *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki* [Vestnik KRAUNTS. Phys.-mat. Sciences]. 2018. No4 (24). S. 109-116.

5. Buzdov A.K., Titov A.S. *Virtual'noye prototipirovaniye proyektiruyemogo protyazhennogo truboprovoda, vstraivayemogo v set' gorodskogo vodosnabzheniya* [Virtual prototyping of a designed extended pipeline built into a city water supply network] // *Izvestiya KBNTS RAN* [News of the Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2019. No. 4 (90). P. 5-13.

## MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMUM DESIGN OF LONG PIPELINES INTEGRATED INTO THE CITY WATER SUPPLY NETWORK

V.Ch. KUDAEV, A.K. BUZDOV

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –  
branch of Federal public budgetary scientific establishment "Federal scientific center  
"Kabardin-Balkar Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"  
360000, KBR, Nalchik, 37-a, I. Armand St.  
E-mail: iipru@rambler.ru

*Currently, due to the growth of cities and the dense development of the city territory, long pipelines are being created that are built into the city water supply network. Existing methods of computer-aided design of trunk pipelines (TP) have a common drawback - they do not represent solutions for TP sections in an analytical form, i.e. in the form of a single formula, the parameters of which reflect the most important characteristics of the pipeline.*

*In the presented work, on the basis of the development and formalization of the engineering approach in the design of reliably functioning extended pipelines, taking into account the costs of its creation and operation, a method for the analytical solution of the optimal TP design problem has been developed. The inclusion of engineering practice provides "soft" optimization without sharp pressure drops across sections of the pipeline for its reliable operation.*

**Keywords:** water supply system, extended pipeline, optimal design problem, analytical solution, computer-aided design.

*Работа поступила 29.11.2019 г.*