

## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ДИАМЕТРОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ КОНВЕКТИВНО-ДИФФУЗИОННОГО МЕТОДА УСЛОВНОЙ МИНИМИЗАЦИИ

© 2017

**В.В. Федоров**, начальник сектора конструкторского бюро  
ОАО «Тольяттиазот», Тольятти (Россия)

**С.В. Афанасьев**, доктор технических наук, кандидат химических наук,  
профессор кафедры «Рациональное природопользование и ресурсосбережение»  
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

*Ключевые слова:* гидравлическая сеть; условная минимизация; конвективно-диффузионный метод.

*Аннотация:* В статье расчет оптимальных диаметров трубопровода основан на решении задачи условной минимизации с помощью производных. Гидравлическая сеть, состоящая из нескольких взаимосвязанных участков трубопровода, предназначена для подачи жидкости или газа различным потребителям оптимальным образом. В общем случае оптимизация должна выполняться по нескольким критериям. Так, например, при транспортировании в трубопроводе опасных сред наряду со стоимостью гидравлической сети необходимо учитывать и фактор опасности.

Многокритериальную оптимизацию можно свести к решению задачи условной минимизации некоторого критерия, который зависит от диаметров участков трубопровода. В статье в качестве такого критерия принимается суммарный объем трубопровода. Но непосредственная оптимизация по диаметрам участков трубопровода со сложной топологией в виде замкнутой гидравлической сети требует выполнения многократных итерационных гидравлических расчетов. Применение специализированных программ и алгоритмов, предназначенных для получения конечных выходных параметров, практически не позволяет выполнять оптимизацию методами выше нулевого порядка. Тем не менее для получения более точных результатов для решения задачи оптимизации по нескольким критериям представляется предпочтительным применение детерминированных методов первого порядка.

В статье для оптимизации используется концепция условной минимизации критерия, который рассчитывается декомпозиционным методом. Система трубопроводов разбивается на отдельные участки, гидравлический расчет которых не представляет особого труда. Независимыми переменными являются напоры в узлах и диаметры участков, а ограничивающими условиями – уравнения материального баланса в узлах. При известных значениях напоров и диаметров легко рассчитываются расходы потоков в участках. Упрощенный гидравлический расчет позволяет решать задачу оптимизации с помощью производных. Задача многомерной условной оптимизации решается разработанным детерминированным методом, в котором моделируется конвективно-диффузионное перемещение частиц с помощью дифференциальных уравнений. Результаты численных экспериментов подтверждают применимость предлагаемого подхода.

### ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей при проектировании трубопроводов является определение оптимальных диаметров для подачи необходимого расхода жидкости или газа с заданными напорами. Если для простого трубопровода расчет диаметра по известному расходу потока и располагаемому напору не представляет особого труда, то для выбора диаметров участков трубопровода со сложной топологией в виде замкнутой сети требуется решение оптимизационной задачи вида

$$\begin{aligned} V(\mathbf{d}) &\rightarrow \min; \\ h_i(\mathbf{d}) &\geq a_i; \\ Q_i(\mathbf{d}) &= b_i, \quad i=1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $V$  – критерий оптимизации;  
 $\mathbf{d}$  – вектор искомых диаметров;  
 $h_i$  и  $Q_i$  – напор и расход для  $i$ -го потребителя;  
 $a_i$  и  $b_i$  – положительные константы;  
 $m$  – количество потребителей.

В замкнутой гидравлической сети отсутствует явная зависимость расходов и напоров от диаметров. Математическая модель распределения потоков представляет собой систему нелинейных уравнений, которая может быть решена только в результате выполнения дополнительных итерационных и оптимизационных расчетов

[1–3]. В настоящее время для выполнения проверочных гидравлических расчетов разработано множество специальных программ. Тем не менее непосредственная минимизация критерия с многократной проверкой ограничивающих условий в (1) с разными стандартными диаметрами путем использования алгоритмов и программ [4], предназначенных для получения конечных результатов, не представляется возможной методами выше нулевого порядка.

Так как процесс оптимизации сложной системы по результатам расчета с помощью стандартных программ основан на концепции исследования «черного ящика», то большое распространение получили стохастические методы глобальной оптимизации [5]. Так, например, в публикациях [6–8] для расчета оптимального распределения воды в гидравлической сети приведены генетические алгоритмы. В [9–11] предложены улучшения и модификации этих алгоритмов. Предлагались также и другие методы, основанные на имитации отжига [12], роя пчел [13], колонии муравьев [14] и эвристических положениях [15].

Как известно, главным достоинством стохастических методов является то, что они могут использоваться для любых сложных многоэкстремальных целевых функций. Но все стохастические методы имеют один общий недостаток, заключающийся в вероятностном

характере получения результатов. Для получения более точных значений диаметров гидравлической сети представляется предпочтительным применение детерминированного метода оптимизации с помощью производных.

**ОПИСАНИЕ МЕТОДА**

В методе используется концепция условной оптимизации с расчетом простейших элементов химико-технологической системы в результате декомпозиции [16]. Как известно, в большинстве случаев сложные химико-технологические системы рассчитываются декомпозиционным методом. Система разбивается на простые элементы, которые рассчитываются с предварительно принятыми значениями входных переменных  $\mathbf{c}=(c_1, c_2, \dots, c_n)$  и уточняемыми в результате повторных расчетов до выполнения условий вида

$$|q_j(\mathbf{c})| \leq \varepsilon, j=1, 2, \dots, m,$$

где  $q_j(\mathbf{c})$  представляет собой некоторую разность;  $\varepsilon$  – малое число.

Таким образом, задачу параметрической оптимизации также можно упростить с концепцией декомпозиционного метода расчета выходных переменных, формально записав ее в виде задачи условной оптимизации:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{c}) \rightarrow \min; \\ g_j(\mathbf{c}) \leq 0, j=1, 2, \dots, m, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\mathbf{c}$  – вектор независимых переменных;  $f(\mathbf{c})$  – критерий оптимизации;  $g_j(\mathbf{c})$  – функции ограничения.

В нашем случае гидравлическая сеть, изображенная в качестве примера на рис. 1, разбивается на отдельные участки  $i-j$ , расчет пропускной способности которых при заданных напорах  $h_i, h_j$  и диаметрах  $d_{ij}$  по формуле, получаемой из уравнения Дарси – Вейсбаха для несжимаемой жидкости, не представляет особого труда:

$$Q_{ij} = \text{sign}(h_i - h_j) \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \sqrt{\frac{2g|h_i - h_j|}{l_{ij} \lambda_{ij} / d_{ij}}}, \quad (3)$$

где  $l_{ij}$  – длина участка;  $\lambda_{ij}$  – коэффициент трения;

$g$  – ускорение свободного падения;

$$\text{sign}(h_i - h_j) = \begin{cases} 1, & \text{при } h_i \geq h_j \\ -1, & \text{при } h_i < h_j \end{cases}.$$

Принимая в качестве независимых переменных напоры и диаметры отдельных участков трубопровода и в качестве критерия оптимизации объем трубопровода, запишем задачу следующим образом:

$$\begin{aligned} V(\mathbf{c}) \rightarrow \min; \\ a_i - h_i \leq 0 \text{ для узлов с потребителями } (i=2, 4); \\ |\sum_j Q_{ji}(\mathbf{c})| - \varepsilon \leq 0 \text{ для узлов без потребителей } (i=0, 1, 3); \\ Q_{out,i} - \sum_j Q_{ji}(\mathbf{c}) \leq 0 \text{ для узлов с потребителями } (i=2, 4), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{c}=(\mathbf{h}, \mathbf{d})$ ,  $\mathbf{h}=(h_1, h_3)$  и  $\mathbf{d}=(d_{0,1}, d_{1,2}, d_{0,3}, d_{3,2}, d_{3,4}, d_{1,4})$  – векторы искомых параметров;  $a_i$  – положительные константы;  $\varepsilon$  – малое положительное число;  $V(\mathbf{c})$  – критерий оптимизации.

Упрощение расчета функций позволяет вычислять их частные производные по искомым переменным. Частная производная объема по диаметру легко определяется по формуле

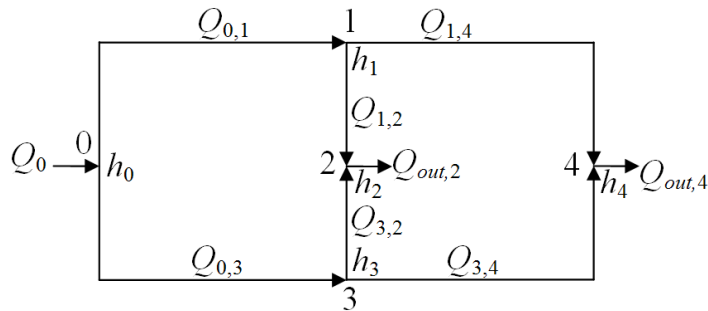
$$\partial V / \partial d_{ij} = 1/2 \cdot \pi d_{ij} l_{ij}.$$

Объем  $V(\mathbf{c})$  не зависит явно от  $h_i$ , но для вычисления частной производной объем участка  $i-j$  можно выразить через произведение длины  $l_{ij}$  на необходимое живое сечение потока  $S_{ij}$  при заданном расходе и располагаемом напоре:

$$V_{ij} = l_{ij} S_{ij} = l_{ij} \frac{|Q_{ij}|}{w_{ij}} = \frac{l_{ij} |Q_{ij}|}{\sqrt{2g \frac{|h_i - h_j|}{\lambda_{ij} l_{ij} / d_{ij}}}},$$

где  $w_{ij}$  – скорость потока. Тогда

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial h_i} = -\frac{1}{2(h_i - h_j)} \frac{l_{ij} |Q_{ij}|}{\sqrt{2g \frac{|h_i - h_j|}{\lambda_{ij} l_{ij} / d_{ij}}}} = -\frac{V_{ij}}{2(h_i - h_j)}.$$



**Рис. 1.** Гидравлическая сеть:  
 $Q_{out,i}$  – расходы для потребителей;  
 $Q_{i,j}$  – расходы в участках;  
 $h_i$  – напоры в узлах

Соответственно

$$\frac{\partial V_{ij}}{\partial h_j} = \frac{V_{ij}}{2(h_i - h_j)}.$$

Частные производные ограничивающих функций:

$$\frac{\partial}{\partial c_k} (a_i - h_i) = \begin{cases} -1, & c_k = h_i; \\ 0, & c_k \neq h_i; \end{cases}$$

$$\frac{\partial}{\partial c_k} \left( \left| \sum_j Q_{ji}(c) \right| - \varepsilon \right) = \text{sign} \left( \sum_j Q_{ji}(c) \right) \sum_j \frac{\partial Q_{ji}(c)}{\partial c_k};$$

$$\frac{\partial}{\partial c_k} \left( Q_{out,i} - \sum_j Q_{ji}(c) \right) = - \sum_j \frac{\partial Q_{ji}(c)}{\partial c_k}.$$

Запишем выражения для частных производных расхода  $\partial Q_{jk}/\partial c_k$ , входящих в выражения ограничивающих функций:

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial h_i} = \frac{1}{2} \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \frac{2g|h_i - h_j|}{\sqrt{l_{ij} \lambda_{ij}/d_{ij}}} \frac{1}{|h_i - h_j|} = \frac{1}{2} \frac{|Q_{ij}|}{|h_i - h_j|},$$

соответственно

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial h_j} = - \frac{1}{2} \frac{|Q_{ij}|}{|h_i - h_j|}.$$

Пренебрегая зависимостью коэффициента трения от диаметра трубопровода, после преобразований получаем

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial d_{ij}} &= \text{sign}(h_i - h_j) \frac{5}{2d_{ij}} \frac{\pi d_{ij}^2}{4} \frac{\sqrt{2g|h_i - h_j|}}{\sqrt{l_{ij} \lambda_{ij}/d_{ij}}} = \\ &= \text{sign}(h_i - h_j) \frac{5}{2d_{ij}} |Q_{ij}| \end{aligned}$$

Таким образом, малые вычислительные затраты на вычисление частных производных целевой и ограничивающих функций с выбранными независимыми переменными позволяют выполнение оптимизации с помощью производных. В нашем случае многомерная условная оптимизация выполняется с помощью уравнений конвективной диффузии.

*Конвективно-диффузионный метод минимизации*

В применяемом методе условной минимизации имитируется конвективно-диффузионное перемещение частиц многокомпонентного потока с концентрацией  $c_i$  в многомерном пространстве с координатами  $\mathbf{c}=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ :

$$\partial c_i / \partial \tau = D \partial^2 c_i / \partial l^2 - w_i \partial c_i / \partial l + \sigma \varphi_i, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

где  $D$  и  $\sigma$  – коэффициент диффузии и штрафной параметр, имеющие малые и большие значения соответственно;

$\tau$  – время;

$l$  – координата на отрезке;

$w_i = -\partial f(\mathbf{c}) / \partial c_i / [\sum_k (\partial f(\mathbf{c}) / \partial c_k)^2]^{0.5}$ ;

$\varphi_i = -\partial g_{\max}(\mathbf{c}) / \partial c_i / [\sum_k (\partial g_{\max}(\mathbf{c}) / \partial c_k)^2]^{0.5}$ ;

$g_{\max}(\mathbf{c}) = \max(g_j(\mathbf{c}))$ .

В результате численного интегрирования дифференциальных уравнений (5) методом прогонки с принятыми граничными и начальными условиями поиска до наступления стационарного состояния многомерная минимизация сводится к минимизации на отрезке, которую можно выполнить простым методом перебора, как изображено на рис. 2.

Как показано в [17; 18], при малых затратах на вычисление частных производных целевой функции временная сложность данного метода должна быть пропорциональна размерности минимизации в первой степени.

*Алгоритм расчета оптимальных диаметров*

1. Задаются граничные и начальные условия для дифференциальных уравнений (5): при  $l=0$   $c_i(0, \tau) = c_{i,\max}$ ; при  $l=1$   $c_i(1, \tau) = c_{i,\min}$ ; при  $\tau=0$ : при  $0 < l \leq 1/2$   $c_i(l, 0) = c_{i,\max}$ ; при  $1/2 < l \leq 1$   $c_i(l, 0) = c_{i,\min}$ .

2. С принятыми значениями параметров  $D$  и  $\sigma$  дифференциальные уравнения (5) интегрируются методом конечных разностей до наступления стационарного состояния с заданной точностью.

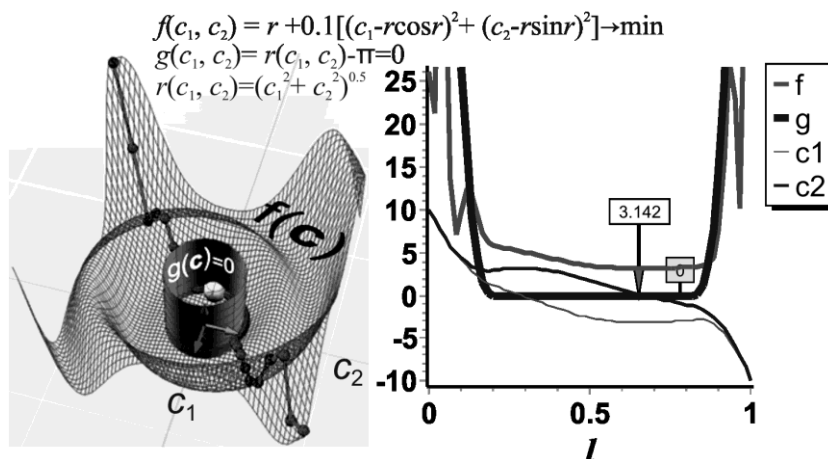


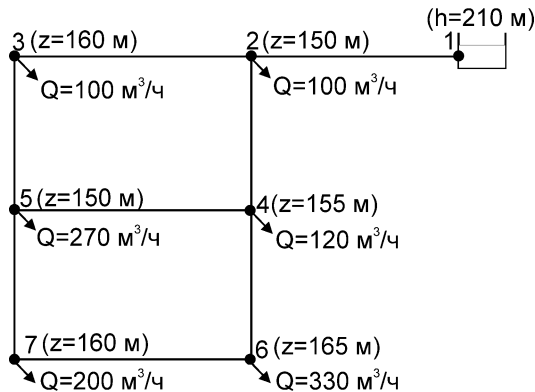
Рис. 2. Сведение многомерной минимизации к минимизации на отрезке

3. На отрезке в полученной области выполнения условий минимизации методом простого перебора ищется точка с минимальным значением критерия с соответствующими переменными  $c_i$ .

4. Для получения более точных значений интегрирование уравнений (5) повторяется в новой области, в центре которой находится точка, полученная в предыдущем расчете.

**ПРИМЕР**

В качестве примера взята двухконтурная гидравлическая сеть, приведенная в [19], для подачи воды по схеме, изображенной на рис. 3.



**Рис. 3.** Двухконтурная гидравлическая сеть:  
*h* – напор; *z* – геометрическая высота;  
*Q* – расход воды;  
 длина каждого участка – 1000 м

В статье [20] перечислены результаты минимизации стоимости трубопроводов, полученные разными авторами при дискретной оптимизации данной сети со стандартными диаметрами, приведенными в таблице 1.

В нашем случае для поиска оптимальных значений диаметров решалась задача минимизации объема гидравлической сети вида

$$\begin{aligned}
 &V(\mathbf{c}) \rightarrow \min; \\
 &30 + z_i - h_i \leq 0; \\
 &Q_{out,i} - \sum_j Q_{ji}(\mathbf{c}) \leq 0, \quad i=2, 4, \dots, 7,
 \end{aligned}$$

где  $\mathbf{c}=(h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, d_{12}, d_{23}, d_{24}, d_{35}, d_{45}, d_{57}, d_{46}, d_{67})$ , с помощью конвективно-диффузионного метода.

Пропускная способность участков трубопровода рассчитывалась по формуле Хазена – Вильямса с коэффициентом шероховатости 130. Согласно полученным результатам, приведенным в таблице 2, минимальный необходимый объем трубопроводов равен 559 м<sup>3</sup>, интерполированная стоимость составляет 416965 единиц.

**Таблица 1.** Стандартные диаметры трубопроводов

Диаметр, мм	Цена 1 м, ед.
25,4	2
50,8	5
101,6	11
152,4	16
254,0	32
355,6	60
406,4	90
457,2	130
508,0	170

Для сравнения можно привести диаметры трубопроводов  $\mathbf{d}=(0,4572; 0,2540; 0,4058; 0,2522; 0,4048; 0,0232; 0,1003; 0,2539)$ , которые были получены другими авторами при дискретной оптимизации по стандартному ряду. Объем и стоимость гидравлической сети с такими трубопроводами имеют большие значения: 584 м<sup>3</sup> и 419000 единиц. Но главное, представляется интересным отметить тот факт, что при детерминированной оптимизации с получением более точных результатов выявляется некоторая закономерность. Так, например, в нашем случае участки 3-5 и 5-7 с пренебрежимо малыми диаметрами при подаче с меньшими напорами могут быть исключены из схемы, что подтверждается дополнительными оптимизационными расчетами.

**ВЫВОДЫ**

При декомпозиции замкнутой гидравлической сети на отдельные участки расчет оптимальных диаметров можно свести к решению задачи условной оптимизации. Упрощенный гидравлический расчет позволяет выполнить оптимизацию с помощью производных первого порядка. Результаты численных экспериментов, полученные с помощью конвективно-диффузионного метода минимизации, подтверждают применимость данного подхода. Расчет оптимальных значений диаметров

**Таблица 2.** Результаты оптимизации гидравлической сети

Участок		$d_{ij}$ , м	$l_{ij}$ , м	$h_i$ , м	$h_j$ , м	$Q_{ij}$ , м <sup>3</sup> /ч	$w_{ij}$ , м/с
<i>i</i>	<i>j</i>						
1	2	0,4715	1000,00	210,000	204,036	1121,796	1,78
2	3	0,1576	1000,00	204,036	190,004	100,003	1,42
4	6	0,3861	1000,00	198,939	195,002	530,055	1,26
3	5	0,0018	1000,00	190,004	180,142	0,001	0,07
4	2	0,4517	1000,00	198,939	204,036	-920,271	1,60
5	7	0,0018	1000,00	180,142	190,002	-0,001	0,07
5	4	0,2166	1000,00	180,142	198,939	-270,022	2,04
7	6	0,2536	1000,00	190,002	195,002	-200,026	1,10

предлагаемым детерминированным методом может упростить выбор трубопроводов с ближайшими стандартными диаметрами. Предлагаемый подход может быть также полезен для оптимизации трубопроводов с переменными диаметрами для транспортирования сжимаемых сред.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Simpson A.R., Elhay S. The Jacobian for solving water distribution system equations with the Darcy-Weisbach head loss model // *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*. 2011. Vol. 137. № 6. P. 696–700.
- Белова О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П. Метод контрольного объема для расчета гидравлических сетей // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. № 5. С. 46. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-764.
- Исаенко С.А., Медведева В.Н., Щербашин Ю.Д. Оптимизация расчета гидравлических сетей с висящими узлами // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. Т. 2. № 4. С. 20–27.
- Quinioua M.Le, Mandelb P., Moniera L. Optimization of drinking water and sewer hydraulic management: coupling of a genetic algorithm and two network hydraulic tools // *Procedia Engineering*. 2014. Vol. 89. P. 710–718.
- Abebe A.J., Solomatine D.P. Application of global optimization to the design of pipe networks // *Proc. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Denmark, Balkema*, 1998. P. 989–996.
- Savic D.A., Walters G.A. Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1997. Vol. 123. № 2. P. 67–77.
- Morley M.S., Atkinson R.M., Savic D.A., Walters G.A. GAnet: Genetic algorithm platform for pipe network optimization // *Advances in Engineering Software*. 2001. Vol. 32. № 6. P. 467–475.
- Simpson A.R. Optimization of design of water distribution systems using genetic algorithms // *Slovenian Society of Hydraulic Research, Seminar Series*. 2000. Vol. 1. P. 10.
- Dandy G.C., Simpson A.R., Murphy L.J. An improved genetic algorithm for pipe network optimization // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32. № 2. P. 449–458.
- Montesinos P., Garcia-Guzman A., Ayuso J.L. Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm // *Water Resources Research*. 1999. Vol. 35. № 11. P. 3467–3473.
- Keedwell E., Khu S.T. A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2005. Vol. 18. № 4. P. 461–472.
- Cunha M.C., Sousa J. Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1999. Vol. 125. № 4. P. 215–221.
- Shrivastava M., Prasad V., Khare R. Effect of inertia weight functions of PSO in optimization of water distribution network // *International journal of advanced research in engineering and technology*. 2015. Vol. 6. № 5. P. 43–51.
- Simpson A.R., Maier H.R., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y., Tan C.L. Selection of parameters for ant colony optimization applied to the optimal design of water distribution systems // *International congress on modeling and simulation*. Australia, 2001. P. 1931–1936.
- Loganathan G.V., Greene J.J., Ahn T.J. Design Heuristic for Globally Minimum Cost Water-Distribution Systems // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1995. Vol. 121. № 2. P. 182–192.
- Федоров В.В., Афанасьев С.В. Параметрическая оптимизация химико-технологической системы с помощью конвективно-диффузионного метода условной минимизации // *Вестник Казанского технологического университета*. 2016. Т. 19. № 17. С. 151–153.
- Федоров В.В. Новый конвективно-диффузионный метод глобальной минимизации для решения обратных задач химической кинетики // *Наука и образование*. 2013. № 4. С. 75–90. DOI: 10.7463/0413.0569246.
- Федоров В.В. Минимизация с ограничениями в виде равенств с помощью уравнений конвективной диффузии // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2014. № 2. С. 21–25.
- Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems // *Water Resources Research*. 1977. Vol. 13. № 6. P. 885–900.
- Briti Sundar Sil, Preetam Banerjee, Ajeet Kumar, P. Jarken Bui, Pallavi Saikia. Use of excel-solver as an optimization tool in design of pipe network // *International journal of hydraulic engineering*. 2013. Vol. 4. № 2. P. 59–63. DOI: 10.5923/j.ijhe.20130204.01.

#### REFERENCES

- Simpson A.R., Elhay S. The Jacobian for solving water distribution system equations with the Darcy-Weisbach head loss model. *Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers*, 2011, vol. 137, no. 6, pp. 696–700.
- Belova O.V., Volkov V.Yu., Skibin A.P. Control volume approach for hydraulic circuit calculation. *Inzhenerniy zhurnal: nauka i innovatsii*, 2013, no. 5, p. 46. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-5-764.
- Isayenko S.A., Medvedeva V.N., Shcherbashin Yu.D. Optimisation of calculation of hydraulic networks with dangling nodes. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2010, vol. 2, no. 4, pp. 20–27.
- Quinioua M.Le, Mandelb P., Moniera L. Optimization of drinking water and sewer hydraulic management: coupling of a genetic algorithm and two network hydraulic tools. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 89, pp. 710–718.
- Abebe A.J., Solomatine D.P. Application of global optimization to the design of pipe networks. *Proc. 3rd International Conference on Hydroinformatics, Copenhagen, Denmark, Balkema*, 1998, pp. 989–996.
- Savic D.A., Walters G.A. Genetic algorithm for least-cost design of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1997, vol. 123, no. 2, pp. 67–77.
- Morley M.S., Atkinson R.M., Savic D.A., Walters G.A. GAnet: Genetic algorithm platform for pipe network optimization. *Advances in Engineering Software*, 2001, vol. 32, no. 6, pp. 467–475.

8. Simpson A.R. Optimization of design of water distribution systems using genetic algorithms. *Slovenian Society of Hydraulic Research, Seminar Series*, 2000, vol. 1, p. 10.
9. Dandy G.C., Simpson A.R., Murphy L.J. An improved genetic algorithm for pipe network optimization. *Water Resources Research*, 1996, vol. 32, no. 2, pp. 449–458.
10. Montesinos P., Garcia-Guzman A., Ayuso J.L. Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm. *Water Resources Research*, 1999, vol. 35, no. 11, pp. 3467–3473.
11. Keedwell E., Khu S.T. A hybrid genetic algorithm for the design of water distribution networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2005, vol. 18, no. 4, pp. 461–472.
12. Cunha M.C., Sousa J. Water distribution network design optimization: Simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1999, vol. 125, no. 4, pp. 215–221.
13. Shrivastava M., Prasad V., Khare R. Effect of inertia weight functions of PSO in optimization of water distribution network. *International journal of advanced research in engineering and technology*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 43–51.
14. Simpson A.R., Maier H.R., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y., Tan C.L. Selection of parameters for ant colony optimization applied to the optimal design of water distribution systems. *International congress on modeling and simulation*. Australia, 2001, pp. 1931–1936.
15. Loganathan G.V., Greene J.J., Ahn T.J. Design Heuristic for Globally Minimum Cost Water-Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1995, vol. 121, no. 2, pp. 182–192.
16. Fedorov V.V., Afanasyev S.V. Parametric optimization of chemical-engineering system using the convection-diffusion method of constrained minimization. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 17, pp. 151–153.
17. Fedorov V.V. A new convection-diffusion global minimization method for solving inverse problems of chemical kinetics. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 4, pp. 75–90. DOI: 10.7463/0413.0569246.
18. Fedorov V.V. Minimization with equality constraints by convection-diffusion equations. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, no. 2, pp. 21–25.
19. Alperovits E., Shamir U. Design of optimal water distribution systems. *Water Resources Research*, 1977, vol. 13, no. 6, pp. 885–900.
20. Briti Sundar Sil, Preetam Banerjee, Ajeet Kumar, P. Jarken Bui, Pallavi Saikia. Use of excel-solver as an optimization tool in design of pipe network. *International journal of hydraulic engineering*, 2013, vol. 4, no. 2, pp. 59–63. DOI: 10.5923/j.ijhe.20130204.01.

#### THE CALCULATION OF OPTIMAL DIAMETERS OF HYDRAULIC NETWORK USING THE CONVECTION-DIFFUSION METHOD OF CONSTRAINED MINIMIZATION

© 2017

*V.V. Fedorov*, Chief of section of engineering department  
*OJSC "Togliattiazot", Togliatti (Russia)*

*S.V. Afanasyev*, Doctor of Sciences (Engineering), PhD (Chemistry),  
professor of Chair "Rational nature management and resource-saving"  
*Togliatti State University, Togliatti (Russia)*

*Keywords:* hydraulic network; constrained optimization; convection-diffusion method.

*Abstract:* The paper presents the calculation of optimal pipeline diameters based on the solving the constrained optimization task using the derivatives. The hydraulic network consisting of several interconnected pipeline sections is designed to supply optimally the fluid or gas to various customers. In the general case, the optimization should be performed according to several criteria. For example, when transporting dangerous media through the pipeline, it is necessary to consider not only the hydraulic network cost but the dangerous factor as well.

Multi-criteria optimization can be reduced to the solution of the issue of constrained minimization of some criterion, which depends on the diameter of the pipeline sections. The authors consider the pipeline total volume to be such criterion. But the direct optimization by the segments diameters of a pipeline with the complex topology in the form of a closed hydraulic network requires the multiple iterative hydraulic calculations. The application of specialized programs and algorithms designed to get final output parameters slightly allows carrying out the optimization using the above zero order techniques. However, it seems preferable to use the deterministic methods of the first order to obtain more accurate results for solving the optimization task according to several criteria.

In this paper, for optimization, the authors used the concept of conditional minimization of a criterion, which is calculated by the decomposition method. The pipeline system is divided into separate sections, the hydraulic calculation of which is not hard to carry out. The delivery head in the nodes and the sections diameters are the independent variables and the material balance equations in the nodes are the constraining conditions. At the known values of pressure and diameters, it is easy to calculate the flow rates in the sections. The simplified hydraulic calculation allows to solving the optimization issue by using the derivatives. The multidimensional constrained optimization issue can be solved using the developed deterministic method when the convection-diffusion transfer of particles is simulated using the differential equations. The results of numerical experiments prove the applicability of the proposed approach.