

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЭЛЕВАТОРА И НАСОСНОГО УЗЛА СМЕШЕНИЯ

А.А. ГЕНВАРЕВ

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
Иваново, Российская Федерация
E-mail: ivgenal@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Применяемые компьютерные программы гидравлических расчетов основаны на методике расчета сетей, составленных из активных и пассивных двухполюсников. Применяемые в тепловых сетях водоструйные насосы – элеваторы, являются трехполюсниками, что ограничивает исследование гидравлических режимов потребителей, подключенных к элеваторам.

Материалы и методы: Применяемые в тепловых сетях централизованного теплоснабжения водоструйные насосы – элеваторы с позиции теории цепей представляют собой трехполюсники. Идентификация элеватора насосным узлом смешения – трехполюсником, составленным из двухполюсников, выполняется методом условной оптимизации.

Результаты: Разработан алгоритм и компьютерная программа на Maple, осуществляющие идентификацию заданного элеватора к схеме насосного узла смешения, состоящего из двухполюсников.

Выводы: Идентификация элеватора насосному узлу смешения обеспечивает возможность гидравлических расчетов тепловых сетей с элеваторным присоединением потребителей и открытым водоразбором у них.

Ключевые слова: трехполюсник, элеватор, насосный узел смешения, идентификация, оптимизация с ограничениями.

IDENTIFICATION OF ELEVATOR AND PUMPING ELEMENT OF MELANGE

A.A. GENVAREV

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: ivgenal@mail.ru

Abstract

Background: Applicable computer programs of hydraulic calculation are founded on network calculation methods, which are constructed from active and passive two-terminal devices. Being used in heat networks water-jet pumps are elevators and at the same time three-terminal devices that limit the research of hydraulic modes of users, connected to the elevators.

Materials and methods: Applied in thermal networks of the centralized heat supply systems the water-jet pumps are three-terminal devices which are also elevators according to the theory of circuits. Identification of the elevator by means of pumping element of mixture that is three-terminal device constructed from two-terminal ones, is carried out by the method of conditional optimization.

Results: The author develops the algorithm and the computer program on Maple to identify the given elevator for the scheme of the pumping element of mixture, consisting of two-terminal devices.

Conclusions: Identification of the elevator to pumping element of mixture provides the possibility for hydraulic calculation of heat networks with elevator joining of users and open water pumping for them.

Key words: three-terminal device, elevator, pumping element of melange, identification, optimization with restrictions.

В системах централизованного теплоснабжения с повышенными температурными графиками нашли широкое распространение водоструйные насосы – элеваторы. С их помощью производится снижение температуры до требуемой санитарными нормами (ниже 95 °С) и обеспечивается циркуляция в присоединенной отопительной системе.

Зачастую к одному элеватору подсоединяют несколько отопительных систем и, кроме того, возможен открытый отбор сетевой воды.

В расчетной практике принимают, что сопротивление сопла элеватора значительно больше сопротивления отопительной системы, и поэтому всю отопительную систему в гид-

равлическом расчете идентифицируют соплом элеватора [1].

При расчете эксплуатационных и аварийных режимов указанное упрощение не позволяет определить параметры работы нескольких отопительных систем, подключенных к одному элеватору, и учесть влияние открытого водоразбора.

Наиболее распространенный метод гидравлических расчетов тепловых сетей основан на использовании закона сохранения массы и равенства суммы потерь напора по каждому контуру нулю, то есть аналогов 1-го и 2-го законов Кирхгофа, применяемых для расчета электрических сетей.

При этом любая сложная гидравлическая сеть состоит из пассивных двухполюс-

ков – участков трубопроводов с местными сопротивлениями и активных двухполюсников – участков трубопроводов с установленными на них насосами [2].

Элеватор, или водоструйный насос, является активным трехполюсником, так как не только обеспечивает смешение потоков воды, но и создает напор для преодоления сопротивления отопительной системы.

Очевидно, что для гидравлического расчета тепловой сети элеватор представляет собой невозможность использования методики [2] активных и пассивных двухполюсников. Кроме того, анализ работы элеватора на подключенную тепловую сеть требует знания сопротивления этой сети, что возможно лишь при отсутствии открытого водоразбора. Поэтому фактически отсутствует методика расчета элеваторов, работающих на несколько отопительных систем с водоразбором.

Рассмотрим математический аппарат поиска идентичного элеватору трехполюсника, составленного из двухполюсников. Такая схема известна, применяется в насосных узлах смешения.

Внешняя гидравлическая сеть как бы не заметит замены схемы рис. 1 на схему рис. 2 при выполнении определенных условий.

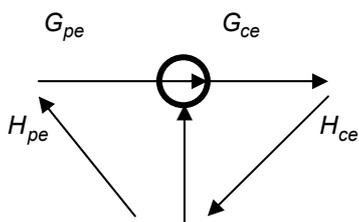


Рис. 1. Схема элеваторного узла смешения

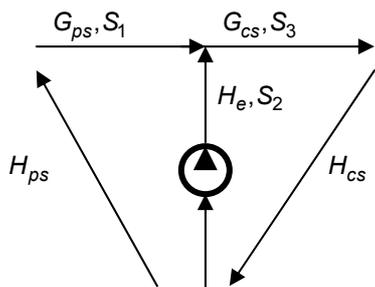


Рис. 2. Схема насосного узла смешения

Условия, при которых трехполюсники будут идентичными, определены в [6].

Согласно этим условиям, необходимо равенство двух расходов и двух величин потерь напора:

$$\left. \begin{aligned} G_{pe} &= G_{ps}, \\ G_{ce} &= G_{cs}, \\ H_{pe} &= H_{ps}, \\ H_{ce} &= H_{cs}, \end{aligned} \right\} (1)$$

где G_{pe} – массовый расход, подаваемый в сопло элеватора, кг/с; G_{ce} – массовый расход, подаваемый элеватором в присоединенную систему отопления, кг/с; H_{pe} – располагаемый напор на сопло элеватора, м в.ст.; H_{ce} – напор, создаваемый элеватором на преодоление сопротивления присоединенной отопительной системы, м в.ст.; G_{ps} – массовый расход, подаваемый на схему насосного узла смешения, кг/с; G_{cs} – массовый расход, подаваемый насосным узлом смешения в присоединенную систему отопления, кг/с; H_{ps} – располагаемый напор перед насосным узлом смешения, м в.ст.; H_{cs} – напор, создаваемый насосным узлом смешения на преодоление сопротивления присоединенной отопительной системы, м в.ст.; S_1 – сопротивление подводящего участка трубопровода, $\text{м}^2\text{с}^2/\text{кг}^2$; S_2 – суммарное сопротивление участка трубопровода с сопротивлением проточной части насоса, на котором установлен подмешивающий насос, $\text{м}^2\text{с}^2/\text{кг}^2$; S_3 – сопротивление отводящего участка трубопровода от насосного узла смешения, $\text{м}^2\text{с}^2/\text{кг}^2$; H_e – напор насоса смешения при нулевой подаче, м в.ст.

Характеристика насоса смешения стабильная и описывается уравнением

$$H_{ns} = H_e - S_{ns} \cdot G_{cs}^2, (2)$$

где S_{ns} – сопротивление проточной части насоса смешения, $\text{м}^2\text{с}^2/\text{кг}^2$.

Сопротивление участка трубопровода с местными сопротивлениями определяется по уравнению Дарси-Вейсбаха:

$$S = \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \zeta \right) \frac{8}{g (\rho \pi d^2)^2}, (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; для тепловых сетей применяется формула Прандтля-Никурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{\left(1,14 + 2 \cdot \lg \frac{d}{k_3} \right)^2}; (4)$$

l – длина участка трубопровода, м; d – внутренний диаметр трубопровода, м; k_3 – коэффициент шероховатости, м; $\Sigma \zeta$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке трубопровода; $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; ρ – плотность воды на участке, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\pi = 3,141592654$.

Потеря напора на участке трубопровода равна

$$\Delta H = S \cdot G^2, (5)$$

где G – массовый расход воды на участке трубопровода, кг/с.

Уравнение характеристики струйного насоса имеет вид [4]

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \varphi_1^2 \frac{f_{p1}}{f_3} \times \frac{v_n}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_{n2}} u^2 - \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \times \right. \\ \left. - \left(2 - \varphi_3^2 \right) \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_3} (1+u)^2 \right], \quad (6)$$

где

$$\Delta p_c = p_c - p_n; \quad (7)$$

$$\Delta p_p = p_p - p_n; \quad (8)$$

$$f_{n2} = f_3 - f_{p1}; \quad (9)$$

$$\frac{f_{p1}}{f_{n2}} = \frac{f_{p1}}{f_3 - f_{p1}}; \quad (10)$$

$$f_{p1} = \frac{\pi d_1^2}{4}; \quad (11)$$

$$f_3 = \frac{\pi d_3^2}{4}; \quad (12)$$

v_p – удельный объем воды, подаваемой к соплу, м³/кг; v_n – удельный объем инжектируемой воды, м³/кг; v_c – удельный объем воды смеси, м³/кг; d_1 – внутренний диаметр сопла, м; d_3 – внутренний диаметр камеры смешения, м.

Технические характеристики элеваторов ВТИ-Теплосеть Мосэнерго приведены в таблице по данным [5].

№ элеватора Nel	Диаметр камеры смешения, мм, d_3	Длина, мм	Коэффициенты скорости			
			φ_1	φ_2	φ_3	φ_4
1	15	425	0,95	0,975	0,812	0,875
2	20	425	0,95	0,975	0,8	0,875
3	25	625	0,95	0,975	0,87	0,875
4	30	625	0,95	0,975	0,844	0,875
5	35	625	0,95	0,975	0,833	0,875
6	47	720	0,95	0,975	0,812	0,875

Расход рабочей среды через сопло элеватора равен, кг/с,

$$G_{pe} = \varphi_1 f_{p1} \sqrt{2 \frac{\Delta p_p}{v_p}}. \quad (13)$$

Так как, Н/м²,

$$\Delta p_p = \frac{g H_{pe}}{v_p}, \quad (14)$$

уравнение (13) после подстановки в него (14) принимает вид, кг/с,

$$G_{pe} = \varphi_1 \frac{f_{p1}}{v_p} \sqrt{2 g H_{pe}}. \quad (15)$$

Так как, Н/м²,

$$\Delta p_c = \frac{g \cdot H_{ce}}{v_c}, \quad (16)$$

то, подставив выражения (14) и (16) в (6), получаем уравнение характеристики элеватора относительно напоров, из которого при

$$H_{ce} = 0 \quad (17)$$

и коэффициенте смешения элеватора

$$U_{max} = \frac{G_{cmax}}{G_{pe}} - 1 \quad (18)$$

после преобразований получаем уравнение, из которого можно найти максимальный расход G_{cmax} через отопительную систему:

$$\frac{v_c}{g} \varphi_1^2 \frac{f_{p1}}{f_3} \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{v_n}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_{n2}} \times \left(\frac{G_{cmax}}{G_{pe}} - 1 \right)^2 + \left(2 - \varphi_3^2 \right) \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_3} \times \left(\frac{G_{cmax}}{G_{pe}} \right)^2 \right] \frac{H_p g}{v_p} = 0. \quad (19)$$

Уравнение (19) относительно неизвестного расхода G_{cmax} является квадратным и имеет два корня – физическому смыслу отвечает только положительный корень.

Напор, создаваемый элеватором для системы отопления при коэффициенте смешения, равном

$$U = \frac{G_c}{G_{pe}} - 1, \quad (20)$$

при заданном расходе G_c будет равен

$$H_{ce} = \frac{v_c}{g} \varphi_1^2 \frac{f_{p1}}{f_3} \left[2\varphi_2 + \left(2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \times \frac{v_n}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_{n2}} \left(\frac{G_c}{G_{pe}} - 1 \right)^2 + \left(2 - \varphi_3^2 \right) \frac{v_c}{v_p} \frac{f_{p1}}{f_3} \times \left(\frac{G_c}{G_{pe}} \right)^2 \right] \frac{H_p g}{v_p}. \quad (21)$$

Необходимые для идентификации расход G_{pn} и напор H_{cn} определяются из уравнений потерь напора, аналогов 2-го закона Кирхгофа [3]:

$$S_2 (G_c - G_{pn}) |G_c - G_{pn}| - H_e - S_1 G_{pn} |G_{pn}| + H_p = 0, \quad (22)$$

$$H_{cn} = H_p - S_1 G_{pn} |G_{pn}| - S_3 G_c |G_c|. \quad (23)$$

Система уравнений (6) будет удовлетворяться при оптимальном подборе величин S_1 , S_2 , S_3 , H_e .

Анализ показывает, что поиск оптимальных величин возможен лишь методами условной оптимизации, так как физической реализации при идентификации отвечают лишь положительные значения неизвестных величин. Таким образом, задача сводится к условной оптимизации с ограничениями:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 > 0, \\ S_2 > 0, \\ S_3 > 0, \\ H_e > 0. \end{array} \right\} \quad (24)$$

Применение «Пакета оптимизации DirectSearch v.2 для Maple» [7,8] позволило построить работоспособный вычислительный алгоритм.

К некоторой сложности следует отнести проверку всех возможных вариантов и выбор из них варианта с минимальным значением оптимизируемой функции отклонений. Это вызвано тем, что оптимизация производится с символьными величинами и заранее невозможно определить численное значение искомого величин. Уравнение (22) решается аналитически как квадратное уравнение, при этом возможны 4 варианта и каждый вариант имеет два корня. Необходимо выполнить вычисления по всем восьми вариантам.

Ниже приведена программа на Maple условного оптимизационного поиска параметров насосного узла смешения, идентичного по расходам и напорам элеватору:

```
> restart;
> #Идентификация элеватора и насосного узла смешения
> with (DirectSearch);
> Nel:=3.:d3:=0.025:fi1:=0.95:fi2:=0.975:
  fi3:=0.87:fi4:=0.875:d1:=0.008:
> t1:=150.:t2:=70.:t3:=95.:g:=9.81:
> fp1:=evalf(Pi*d1^2/4):
> f3:=evalf(Pi*d3^2/4):
> fn2:=f3-fp1:
> r:=9.986228*10^(2)+t*(1.606787*10^(-1)+
  t*(-9.312655*10^(-3)+t*(4.869984*10^(-5)-
  1.180077*10^(-7)*t))):
> rp:=subs(t=150,r):vp:=1/rp:
> rc:=subs(t=95,r):vc:=1/rc:
> rn:=subs(t=70,r):vn:=1/rn:
> Hp:=5.:Gc:=1.4:
> Gpe:=sqrt(2*g*Hp)*fp1*fi1/vp:
> Ug:=Gcg/Gpe-1.:
> g2:=Hce-vc/g*fi1^2*fp1/f3*(2*fi2+
  (2*fi2-1/fi4^2)*vn/vp*fp1/fn2*Ug^2-
  (2-fi3^2)*vc/vp*fp1/f3*(1+Ug)^2)*Hp/vp*g:
> g2:=subs(Hce=0,g2):
> REH:=solve(g2,Gcg):
> REH[1]:REH[2]:
> Gc1:=REH[1]:Gc2:=REH[2]:
> if Gc1>0 then Gcmax:=Gc1 fi;
  Gcmax:=2.181311245
> if Gc2>0 then Gcmax:=Gc2 fi;
> if Gc>Gcmax then print("Расчет неверен, заданный расход больше максимального") fi;
> U:=Gc/Gpe-1:
> Hce:=vc/g*fi1^2*fp1/f3*(2*fi2+
  (2*fi2-1/fi4^2)*vn/vp*fp1/fn2*U^2-
  (2-fi3^2)*vc/vp*fp1/f3*(1+U)^2)*Hp/vp*g:
> #Вариант 1
```

```
>u3:=S2*(Gc-Gpn)^2-He-S1*Gpn^2+Hp:
> #Вариант 2
>#u3:=-S2*(Gc-Gpn)^2-He-S1*Gpn^2+Hp:
> #Вариант 3
>#u3:=S2*(Gc-Gpn)^2-He+S1*Gpn^2+Hp:
> #Вариант 4
>#u3:=-S2*(Gc-Gpn)^2-He+S1*Gpn^2+Hp:
> RE:=solve(u3,Gpn):
> RE[1]:RE[2]:
> Gppn:=RE[1]:
> #Gppn:=RE[2]:
> Hcn:=Hp-S1*Gppn*abs(Gppn)-S3*Gc*abs(Gc):
> f:=(Hce-Hcn)^2+(Gpe-Gppn)^2:
> constr:=[S1>0,S2>0,S3>0,He>0]:
> Y:=Search(f,constr):
Warning, встретилось комплексное или нечисловое значение:
пытаюсь найти допустимую точку
> Y[1]:Y[2,1]:Y[2,2]:Y[2,3]:Y[2,4]:Y[3]:
> fm:=Y[1]:NC:=Y[3]:
  fm:=3.13667908822066 10^-24
  NC:=1912
> Hem:=subs(Y[2,1],He);S1m:=subs(Y[2,2],S1);
  S2m:=subs(Y[2,3],S2); S3m:=subs(Y[2,4],S3);
  Hem:=2.38542705710232994
  S1m:=9.85271363688968016
  S2m:=0.812424201549181047
  S3m:=1.37254259374930010
> u3m:=S2m*(Gc-Gpm)*abs(Gc-Gpm)-
  Hem-S1m*Gpm*abs(Gpm)+Hp:
> Gpm:=fsolve(u3m,Gpm);
  Gpm:=0.5678589356
> if Gpm>Gc or Gpm<0 then print("Неверно") fi;
```

Заключение

Разработанная методика идентификации элеватора насосному узлу смешения с применением математического метода решения оптимизационной задачи с ограничениями на неотрицательность искоемых величин позволяет проводить как наладочные, так и эксплуатационные гидравлические расчеты тепловых сетей с элеваторным присоединением потребителей.

Текст разработанной программы на Maple численного определения параметров идентификационной схемы с насосом смешения применим для инженерных расчетов.

Список литературы

1. **Зингер Н.М.** Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. – М.: Энергия, 1976. – 336 с.
2. **Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей /** под общ. ред. В.Я. Хасилева и А.П. Меренкова. – М.: Энергия, 1978. – 176 с.
3. **Генварев А.А.** Теория расчета и эквивалентирования гидравлических сетей. – Иваново, 2010. – 180 с.
4. **Соколов Е.Я., Зингер Н.М.** Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с.
5. **Сафонов А.П.** Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1968. – 240 с.

6. Millar By William. CXY1. Some General Theorems for Non-Linear Systems Possessing Resistance // Atomic Energy Research Establishment, Harwell [Revised MS, received June 8, 1951].

7. Дьяконов В.П. Maple 9 в математике, физике и образовании. Библиотека профессионала. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 688 с.

8. Пакет оптимизации DirectSearch v.2 для Maple. Сергей Моисеев, 2011. Кодофон. Россия.

References

1. Zinger, N.M. *Gidravlicheskie i teplovye rezhimy teplofikatsionnykh system* [Hydraulic and Heating Modes of Heating Systems], Moscow: Energiya, 1976, 336 p.

2. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setey* [Methods and algorithms of Heat Networks Calculation], Moscow: Energiya, 1978, 176 p.

3. Genvarev, A.A. *Teoriya rascheta i ekvivalentirovaniya gidravlicheskiy setey* [Calculation Theory and Theory of Reduction of Hydraulic Networks], Ivanovo, 2010, 180 p.

4. Sokolov, E.Ya., Zinger, N.M. *Struynye apparaty* [Jet-Stream Devices], Moscow: Energoatomizdat, 1989, 351 p.

5. Safonov, A.P. *Sbornik zadach po teplofikatsii i teplovyim setyam* [Collected Tasks on Installation of Heating Systems and Heat Networks], Moscow: Energiya, 1968, 240 p.

6. Millar, By William. CXY1. Some General Theorems for Non-Linear Systems Possessing Resistance, in Atomic Energy Research Establishment, Harwell [Revised MS, received June 8, 1951].

7. D'yakonov, V.P. *Maple 9 v matematike, fizike i obrazovanii. Biblioteka professionala* [Maple 9 in Mathematics, Physics and Education. Library of Professionals], Moscow: SOLON-Press, 2004, 688 p.

8. Moiseev, S. *Paket optimizatsii DirectSearch v.2 dlya Maple* [Optimization Pack of DirectSearch v.2 for Maple], 2011, Kodofon, Rossiya.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Генварев Алексей Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИСа,

e-mail: ivgenal@mail.ru