

2. P a t r a k h i n, V. A. (2004) Means of Programming PC-Compatible Controllers. *Informatizatsiia i Sistemy Upravleniia v Promyshlennosti* [Data Storage and Control Systems in Industry], 3, 3–8 (in Russian).
3. S l o b o d j u k, M. V., & Golinko, I. M. (2011) The Inspection of Modern Peculiarities of Programming PC-BASED Controllers. *Tezi Dopovidei IX Mizhnar. Nauk.-Prakt. Konf. "Suchasni Problemi Naukovogo Zabezpechennia Energetiki"* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Scientific Support of Power Engineering"]. Kiev: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 304 p. (in Ukrainian).
4. O' D w y e r, A. (2010) *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. 3<sup>rd</sup> ed ICP. Dublin Institute of Technology. 623 p.
5. K u l a k o v, G. T. (2003) *Analysis and Synthesis of Automatic Control System*. Minsk, Tehnoprnt. 136 p. (in Russian).
6. K u z m i t s k y, I. F., & Kulakov, G. T. (2010) *Theory of Automatic Control*. Minsk: BGTU. 574 p. (in Russian).
7. G o l i n k o, I. M. (2013) Synthesis of Optimal Control System. *Naukovi Pratsi Natsional'nogo Universitetu Kharchovikh Tekhnologii* [Scientific Works of National University of Food Technology], 48, 23–28 (in Ukrainian).
8. R o t a c h, V. Ya. (2008) *Theory of Automatic Control*. Moscow: Publishing House of Moscow Power Engineering Institute. 396 p. (in Russian).
9. G o l i n k o, I. M. (2013) Optimal Adjustment of PR Controllers with Integrated Factors of Quality. *Avtomatika-2013: Tezi Dopovidei XX Mizhnar. Konf. z Avtomatichnogo Upravlinnia* [Avtomatika-2013: Proceedings of the XX International Conference about Automatic Control]. Nikolaev, 71–72 (in Ukrainian).
10. G o l i n k o, I. M. (2012) Synthesis of Optimal Control System with Minimization of Regulated influences. *Radioelektronni i Komp'uterni Sistemi* [Radioelectronics and Computer Systems], 2 (54), 79–88 (in Ukrainian).
11. G o l i n k o, I. M., & Kubrak, A. I. (2012) *Methods of Optimization of Control Systems*. Kamenets-Podol'skii, Ruta. 262 p. (in Ukrainian).
12. G o l i n k o, I. M., & Galitska, I. E. (2013) Optimization of Control System with Modular – Type of Quality. *Informatsiini Sistemi, Mekhanika ta Keruvannia* [Information Systems, Mechanics, Control], 9, 105–113 (in Ukrainian).
13. R o m a n e n k o, V. D. (1995) *Methods of Automation of Advanced Technologies*. Kiev, Higher School. 519 p. (in Ukrainian).

Представлена кафедрой ТЭС БНТУ

Поступила 22.01.2014

УДК (519.9+518.5); 532.54

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ**

**Канд. техн. наук КОЛЕСНИКОВ С. В., канд. техн. наук, доц. КУДИНОВ И. В.,  
аспиранты ЕРЕМИН А. В., БРАНФИЛЕВА А. Н.**

*ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет»*

E-mail: totig@yandex.ru

Разработаны основные положения построения компьютерных моделей, предназначенных для проектирования трубопроводных сетей, рассматривая их как единые целые гидравлические системы. Построение новых участков теплосетей возможно лишь после их проектирования с целью обеспечения

функционирования в заданном режиме работы. В практике эксплуатации тепловых сетей основными проблемами являются: недостаточный перепад давления между прямым и обратным трубопроводами, повышенное давление в обратном трубопроводе, разрегулированность сети и другие проблемы. Их причинами могут быть: недостаточные диаметры трубопроводов, уменьшение диаметров труб из-за отложений на внутренних поверхностях, перекрытие задвижек на участках сети с большими скоростями течения теплоносителя, «паразитные» циркуляции и пр. Эффективным средством для наиболее достоверного определения основных причин указанных проблем, имеющихся в любой теплосети, а также для проектирования новых теплосетей являются компьютерные модели, позволяющие практически полностью воспроизводить гидравлические и температурные режимы их работы.

Цель работы – использование компьютерной модели для выполнения проекта нового тепловывода от Тольяттинской ТЭЦ с целью отопления Центрального района г. Тольятти, запитываемого от ТЭЦ Волжского автомобильного завода. С помощью разработанной для решения этой задачи компьютерной модели были определены месторасположение оборудования и его основные характеристики с учетом совместной работы двух источников теплоты (от Тольяттинской ТЭЦ и ТЭЦ Волжского автомобильного завода).

**Ключевые слова:** компьютерная модель, проектирование теплосетей, законы Кирхгофа, теория графов, система алгебраических уравнений, эпюры давлений.

Ил. 6. Библиогр.: 10 назв.

## USING COMPUTER MODELS FOR DESIGN OF COMPLEX PIPELINE SYSTEMS

**KOLESNIKOV S. V., KUDINOV I. V., EREMIN A. V., BRANFILEVA A. N.**

*Federal State – Financed Educational Institution of Higher Professional Education  
“State Technical University of Samara”*

The main rules of computer models construction were developed, which intended for pipeline networks design and they were considered as single whole hydraulic systems. The construction of new sections is possible after their design in order to provide operation in given regime. In heat networks operation we see the following problems: irregular change in pressure between direct and return pipelines, increased pressure in return pipeline, misalignment of network and others. Their causes may be: undersize thickness of pipelines, reduction in diameter caused by scales in internal surfaces of pipes, closure of gate valves in sections of networks with big speeds of heat coolant, “parasitic” circulations and others. Efficient mean for determining the main reasons of these problems, they may be in any heat pipeline, and also for new heating pipe networks design we consider computer models, which allow to simulate (practically in the whole volume) hydraulic and temperature regimes of their work.

The purpose of work – using computer models for implementation of project of new heat removal pipe from Tolyatti central thermal station in order to heat the Central Region of Tolyatti, feeding from heat power station of the Volga car factory. With the help of developed computer model the location of equipment and their main characteristics were determined, they take into account joint work of two sources of heat (central thermal station of Tolyatti and the Volga car factory).

**Keywords:** computer model, design of heat-supply systems, Kirchhoff’s laws, graph theory, system of algebraic equations, pressures diagrams.

Fig. 6. Ref.: 10 titles.

При выполнении расчетов сложных разветвленных многокольцевых гидравлических сетей, запитываемых от нескольких источников, эффек-

тивным направлением оказывается применение компьютерных моделей, которые позволяют практически полностью воспроизводить протекающие в сетях гидравлические процессы, рассматривая их как единые целые гидравлические системы. Такие модели позволяют определять давление, расходы, скорости течения среды, потери напора, расход энергии на перемещение и пр. Решение подобных задач какими-либо другими средствами для указанного вида гидравлических сетей в настоящее время не представляется возможным.

В основу построения компьютерной модели положены два закона Кирхгофа, применяемых при расчетах электрических сетей. Использование этих законов в расчетах гидравлических сетей обосновывается полной аналогией процессов протекания тока в проводниках и жидкости в трубопроводных гидравлических системах [1]. В качестве конкретного примера найдем распределение расходов в сети, состоящей из одного кольца (рис. 1), имеющего три ответвления. Расходы по участкам кольца  $a, b, c, d$  обозначим  $Q_a, Q_b, Q_c, Q_d$ , а по ответвлениям –  $Q_1, Q_2, Q_3$ . Требуется найти распределение расходов по участкам  $a, b, c, d$  при заданном расходе  $Q$  на входе в кольцо. Расходы воды по ответвлениям от кольца  $Q_1, Q_2, Q_3$  известны, а их сумма равна расходу  $Q$  на входе в кольцевую сеть  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ .

Первый закон Кирхгофа в применении к расчету гидравлических систем устанавливает равенство притока и оттока среды в каждом узле сети, т. е. требуется выполнение уравнения баланса расходов

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0, \quad (1)$$

где  $n$  – число трубопроводов, соединяющихся в узле;  $Q_i (i = \overline{1, n})$  – расход среды по всем трубопроводам, соединяющимся в данном узле.

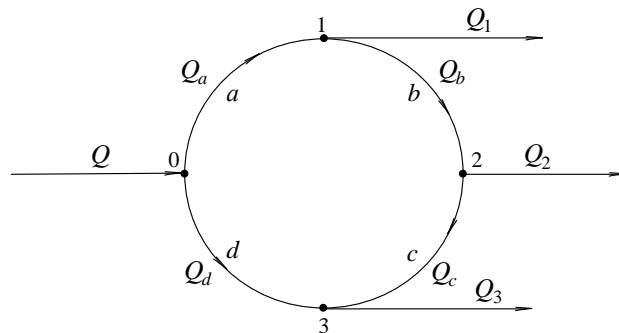


Рис. 1. Схема кольцевой сети

Согласно второму закону Кирхгофа, сумма напоров для любого замкнутого контура равна нулю

$$\sum_{i=1}^n H_i = \sum_{i=1}^n S_i Q_i^2 = 0, \quad (2)$$

где  $S_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – гидравлическое сопротивление  $i$ -го участка;  $Q_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) – расход среды на  $i$ -м участке.

Используя уравнения (1), (2), на основе итеративного метода расчета можно найти распределение расходов по всем участкам сети при известном расходе  $Q$ , заданном на входе в кольцо. На первом шаге итерации задается произвольное распределение расходов среды на каждом участке кольца, т. е. задаются значения  $Q_a, Q_b, Q_c, Q_d$ . Тогда для узлов 0, 1, 2 из первого закона Кирхгофа имеем:

$$Q_d = Q - Q_a; \quad Q_a = Q_1 + Q_b; \quad Q_b = Q_2 + Q_c.$$

По второму закону Кирхгофа на основе принятых расходов по всем участкам кольца найдем величину невязки напоров

$$\delta H = \sum_{i=1}^n S_i Q_i^2 = S_a Q_a^2 + S_b Q_b^2 + S_c Q_c^2 - S_d Q_d^2. \quad (3)$$

Для приближения невязки напоров  $\delta H$  к нулю введем в расчет поправочный (увязочный) расход  $\delta Q$  – он должен вычитаться из величины расхода на перегруженных и добавляться на недогруженных участках. Величину увязочного расхода  $\delta Q$  можно найти из соотношения (3), положив  $\delta H = 0$ :

$$S_a Q_a - \delta Q^2 + S_b Q_b - \delta Q^2 + S_c Q_c - \delta Q^2 - S_d Q_d + \delta Q^2 = 0. \quad (4)$$

Если пренебречь членами, содержащими  $(\delta Q)^2$ , как величинами достаточно малыми, то соотношение (4) относительно увязочного расхода  $\delta Q$  будет представлять алгебраическое линейное уравнение. Его решение

$$\delta Q = \delta H / \left( 2 \sum_{i=1}^n S_i Q_i \right), \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^n S_i Q_i = S_a Q_a + S_b Q_b + S_c Q_c + S_d Q_d$ .

После нахождения  $\delta Q$  уточняются расходы на участках кольца, и указанная последовательность расчетов вновь повторяется. Такой итеративный расчет выполняется до тех пор, пока получаемые из двух последних итераций расходы не будут отличаться на заданную (достаточно малую) величину.

В случае многокольцевых разветвленных гидравлических сетей реализация изложенного алгоритма расчета потокораспределения возможна лишь с использованием вычислительной техники [2–10]. Для этого необходимо создать компьютерную модель гидравлической сети. При этом используется теория графов [8], согласно которой создается «дерево» теплосети. Графическая интерпретация графа дана на рис. 2. Здесь цифрами 1, 2, 3, ..., 9 обозначены вершины графа, а буквами а, б, в, ... – его дуги. Применительно к гидравлической сети вершины графа интерпретируют

точки соединения трубопроводов, а дуги – участки трубопроводных систем. Для описания алгоритмов расчета используется специальная нумерация вершин и дуг «дерева». Каждая вершина (узел) характеризуется номером (именем), геодезической отметкой высоты расположения, величиной притока или оттока среды и др. Каждая дуга графа имеет следующие характеристики: номер (имя), длину и диаметр труб, коэффициент гидравлического сопротивления и другие параметры.

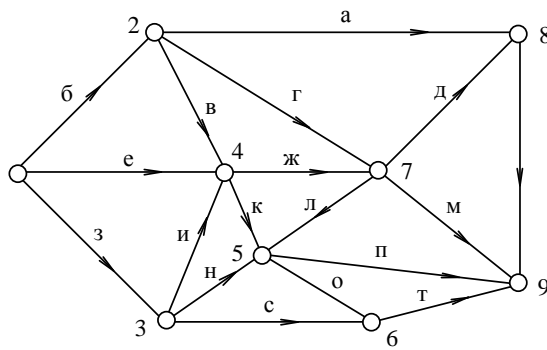


Рис. 2. Графическая интерпретация графа

Соотношений (3), (5) формально достаточно для построения замкнутой системы уравнений относительно неизвестных расходов в ветвях сети и давлений в ее узлах.

При разработке компьютерной модели определяются гидравлические характеристики трубопроводов теплосети. Потери напора в трубопроводе складываются из потерь на трение (линейные) и в местных сопротивлениях

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2g} + \sum \xi \frac{w^2}{2g}, \quad (6)$$

где  $\Delta h$  – потери напора, м;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $l$  – длина трубопровода, м;  $d$  – внутренний диаметр, м;  $w$  – средняя скорость, м/с;  $\sum \xi$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений на участке.

Вводя понятие эквивалентной длины, потери напора на местные сопротивления можно свести к линейным потерям. Эквивалентная длина местных сопротивлений находится из соотношения

$$l_3 = d \sum \xi / \lambda. \quad (7)$$

С учетом (7) формула (6) примет вид

$$\Delta h = \frac{w^2}{2g} \left( \lambda \frac{l}{d} + \lambda \frac{l_3}{d} \right) = \frac{\lambda w^2}{2dg} (l + l_3). \quad (8)$$

Если расход жидкости через участок  $Q$ , то

$$w = 4Q / \pi d^2. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), находим

$$\Delta h = \frac{8\lambda l + l_3}{\pi^2 g d^5} Q^2.$$

Таким образом, гидравлическая характеристика участка (трубы) принимает вид

$$\Delta h = sQ^2,$$

где  $s = \frac{8\lambda l + l_3}{\pi^2 g d^5}$  – гидравлическое сопротивление трубы,  $\text{с}^2/\text{м}^5$ .

Гидравлическая характеристика участка (задвижки) имеет вид

$$\Delta h = sQ^2,$$

где  $s$  – коэффициент сопротивления задвижки, зависящий в основном от степени ее открытия.

Участки – насосы – в расчетной схеме гидравлической сети представлены аналитическими характеристиками, связывающими между собой напор, развиваемый насосом, и подачу. Характеристика насоса в координатах  $Q$ – $H$  с достаточной для практики точностью может быть выражена уравнением вида

$$H = H_\phi - Q_n^2 S_\phi, \quad (10)$$

где  $H_\phi$  – напор, развиваемый насосом при закрытой на выходе задвижке ( $Q_n = 0$ ), м;  $Q_n$  – подача насоса,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_\phi$  – гидравлическое сопротивление насоса.

С использованием компьютерной модели выполнен проект нового (четвертого) тепловывода от Тольяттинской ТЭЦ (ТоТЭЦ) с целью отопления Центрального района г. Тольятти, запитываемого в настоящее время от ТЭЦ Волжского автомобильного завода (ТЭЦ ВАЗ) (длина магистралей – 12 км, диаметр трубопроводов – 1200 мм, расход теплоносителя – до 10000 т/ч). Этот проект позволил определить месторасположение оборудования (насосные, задвижки, регулирующие клапаны и пр.), его основные характеристики, причем с учетом совместной работы двух источников теплоты (ТоТЭЦ и ТЭЦ ВАЗ). Необходимость данной работы связана с планами реконструкции тепловых сетей ТоТЭЦ с целью передачи части нагрузки для отопления потребителей Центрального района г. Тольятти с ТЭЦ ВАЗ на ТоТЭЦ. С этой целью выполнен проект строительства 4-го тепловывода от ТоТЭЦ, состоящего из трех трубопроводов  $\text{Ø}1200$  мм, один из которых – резервный.

На первом этапе предусматривается передача нагрузки 3-го района г. Тольятти в количестве 4600 т/ч. С учетом перспективного роста нагрузки этого района расход теплоносителя может составлять 5800 т/ч.

На втором этапе предполагается передача всей нагрузки 3-го (5800 т/ч) и части нагрузки 2-го районов (до 3000 т/ч) с ТЭЦ ВАЗ на ТоТЭЦ. Кроме того, на 4-й вывод ТоТЭЦ планируется передача части нагрузки 15-й магистрали Тольяттинских тепловых сетей (ТоТС) в объеме 1600 т/ч. В связи

с тем, что теплосеть ТоТЭЦ работает по закрытой схеме и имеет ограниченные возможности по подпитке, подпитку в необходимых количествах планируется осуществлять за счет ТЭЦ ВАЗ.

Ниже представлены результаты расчетов на компьютерной модели гидравлических режимов проектируемых трубопроводов 4-го тепловывода ТоТЭЦ и тепловыводов от ТЭЦ ВАЗ до насосных ПНС-1, ПНС-2 и ПНС-3 при их совместной работе. На первом этапе передачи нагрузки были заданы следующие технические условия.

1. В точке подключения 4-го тепловывода ТоТЭЦ к сетям ТЭЦ ВАЗ (точка *D* на рис. 3–6) давление в подающем трубопроводе должно быть  $11 \text{ кгс/см}^2$ .

2. Подпитка третьего района теплосетей ТЭЦ ВАЗ должна выполняться от сетей 2-го района через существующую переемычку диаметром 1000 мм между обратными магистралями 2-го и 3-го районов (рис. 3, линия *AB*).

3. Для поддержания постоянного давления в обратном трубопроводе 2-го района установить регулятор давления (РД) (рис. 3–6), поддерживающий давление в точке его установки (до себя)  $p_2 = 7 \text{ кгс/см}^2$ .

Из трех проектируемых трубопроводов 4-го вывода ТоТЭЦ в данном варианте присоединения к теплосетям ТЭЦ ВАЗ используются два (прямой и обратный). Третий трубопровод находится в резерве.

Расчет параметров работы теплосети выполнен для трех различных режимов, отличающихся величиной нагрузок 3-го района: существующей, перспективной и минимальной. Исходные данные для режима с существующей нагрузкой были приняты на основе реального режима работы теплосети. Расход воды в подающем трубопроводе 3-го района составлял 4575 т/ч, в обратном – 3097 т/ч. Расход на горячее водоснабжение (ГВС) – 1478 т/ч. Соответствующие данные по 2-му району – 5064, 3181 и 1883 т/ч.

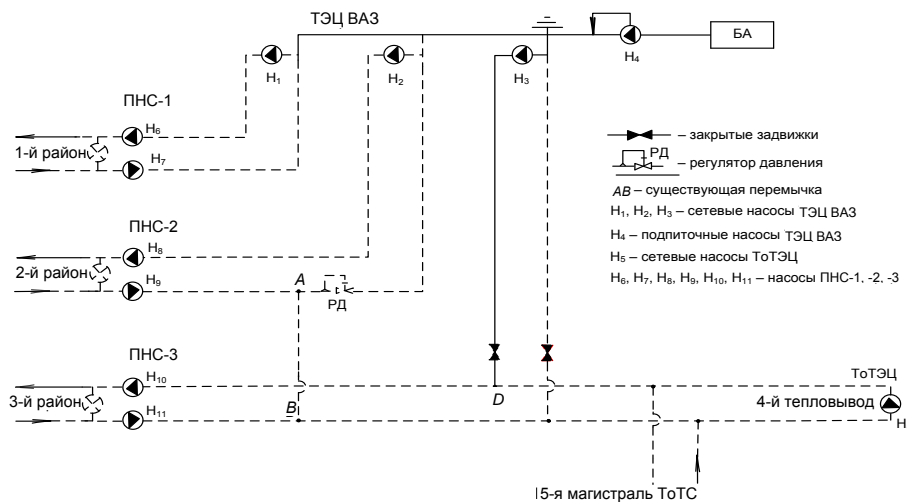


Рис. 3. Принципиальная схема присоединения 4-го тепловывода ТоТЭЦ к тепловым сетям ТЭЦ ВАЗ

Величина подпитки контура 4-го вывода ТоТЭЦ была равна водоразбору 3-го района ТЭЦ ВАЗ и составляла 1478 т/ч. Давление в обратном трубопроводе 2-го вывода на ТЭЦ ВАЗ –  $2,2 \text{ кгс/см}^2$ . Давление в подающих

трубопроводах после насосных ПНС-2 ( $H_8$ ) и ПНС-3 ( $H_{10}$ ) (2-й и 3-й зон) –  $10 \text{ кгс/см}^2$ . Давление в обратном трубопроводе перед ПНС-2 составляло  $3,0 \text{ кгс/см}^2$ , а перед ПНС-3 –  $4,5 \text{ кгс/см}^2$ .

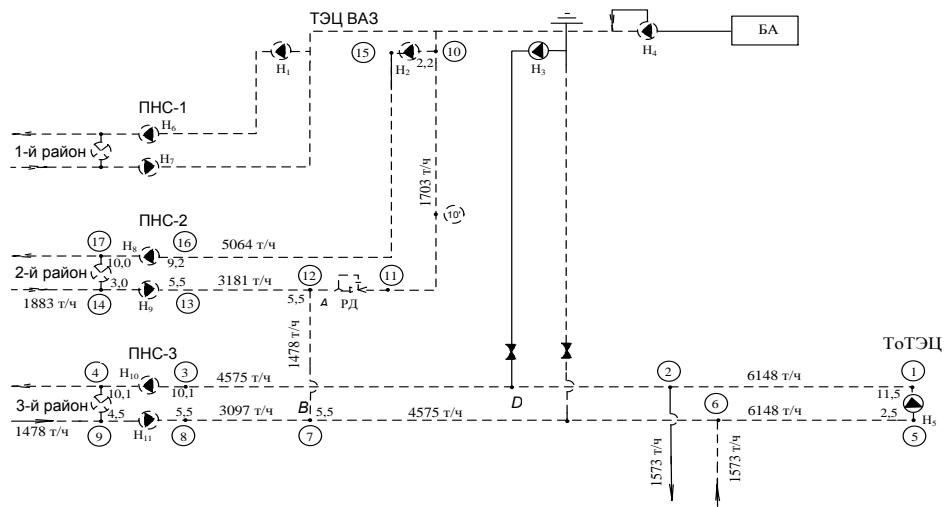


Рис. 4. Исходные данные и результаты расчетов гидравлического режима при существующей нагрузке: ①, ②... – номер точек; цифры при точках – давление,  $\text{кгс/см}^2$

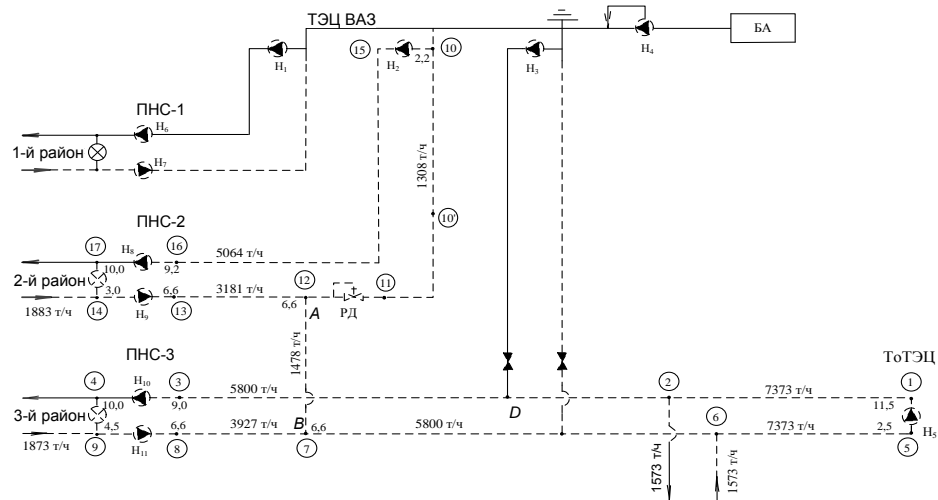


Рис. 5. Исходные данные и результаты расчетов гидравлического режима при увеличенной нагрузке

С учетом дополнительной нагрузки 15-й магистрали ТоТС (1573 т/ч) суммарный расход воды в подающем трубопроводе (а следовательно, и в обратном) 4-й магистрали ТоТЭЦ был равен 6148 т/ч.



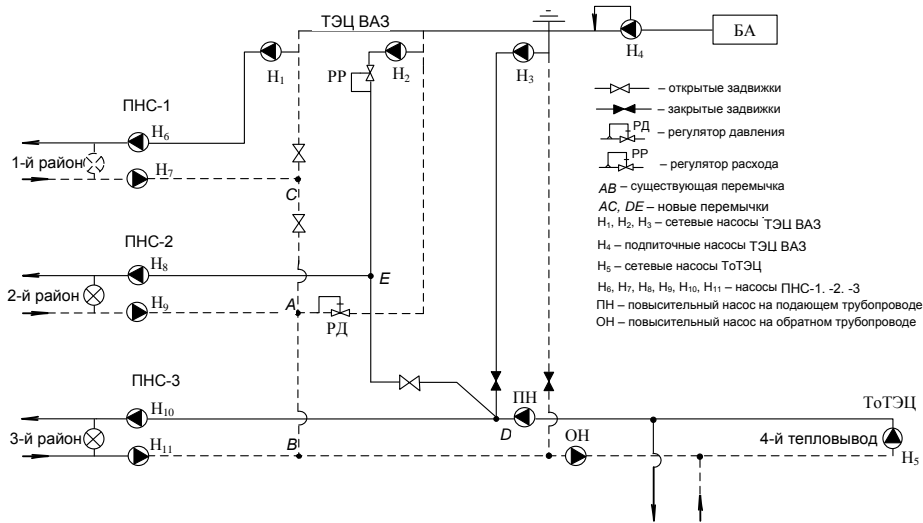


Рис. 6. Принципиальная схема присоединения 4-го тепловывода ТоТЭЦ к тепловым сетям ТЭЦ ВАЗ с повысительными насосами на подающей и обратной магистралях 4-го тепловывода

Основным параметром регулирования по принятой схеме работы является давление на всасе подпорных насосов ТоТЭЦ (точка 5 на рис. 4, 5). Оно должно быть в пределах  $1,5\text{--}3,0 \text{ кгс/см}^2$ . Поддержание данного параметра в указанном диапазоне давлений обеспечивается соответствующей настройкой регулятора давления РД, устанавливаемого на обратном трубопроводе 2-го вывода ТЭЦ ВАЗ.

Исходные данные и результаты расчетов этого режима представлены на рис. 4. Как показали расчеты, для обеспечения давления на всасе подпорных насосов ТоТЭЦ на уровне  $2,5 \text{ кгс/см}^2$  РД необходимо настроить на давление  $5,5 \text{ кгс/см}^2$ , что не превышает заданной техническими условиями величины давления в этой точке ( $7 \text{ кгс/см}^2$ ).

Давление перед потребителями 3-го района (после ПНС-3) на требуемом уровне ( $10 \text{ кгс/см}^2$ ) может быть обеспечено ТоТЭЦ, что исключает необходимость работы повысительных насосов на ПНС-3. При этом давление в подающем трубопроводе 4-го вывода на ТоТЭЦ должно составлять не менее  $11,5 \text{ кгс/см}^2$ . Резервы насосов ТоТЭЦ позволяют поддерживать и более высокое давление.

Гидравлические режимы обратных трубопроводов 2-го и 3-го районов обеспечиваются работой понизительных насосов насосных ПНС-2 (H<sub>9</sub>) и ПНС-3 (H<sub>11</sub>). Режимы работы трубопроводов 1-го вывода (1-й район) и подающего трубопровода 2-го вывода ТЭЦ ВАЗ остаются без изменений.

Анализ графиков позволяет заключить, что на участке 10'–11 обратного трубопровода 2-го тепловывода ТЭЦ ВАЗ (от ТЭЦ ВАЗ до регулятора давления РД) давление снижается до величин около 10 м, что создает опасность вскипания жидкости. Это связано с уменьшением расхода на участке 10–11 2-го тепловывода ТЭЦ ВАЗ на величину подпитки 4-го вывода ТоТЭЦ. В связи с чем рекомендуется избыточное давление, создаваемое подпиточными насосами ТЭЦ ВАЗ в точке 10, поднять до 30–35 м.

Для расчета гидравлического режима с перспективным увеличением нагрузки на 3-м районе ТЭЦ ВАЗ были приняты следующие исходные данные. Расход воды в подающем трубопроводе 3-го района составлял 5800 т/ч, в обратном – 3972 т/ч, водоразбор на ГВС – 1873 т/ч (подпитка контура 4-го вывода ТоТЭЦ была равна водоразбору на ГВС 3-го района, т. е. 1873 т/ч). С учетом подачи воды на 15-ю магистраль ТоТС в количестве 1573 т/ч суммарный расход на 4-м выводе ТоТЭЦ составлял 7373 т/ч. Расход воды на потребители 2-го района ТЭЦ ВАЗ был неизменным.

Исходные данные и результаты расчетов гидравлического режима при увеличенной перспективной нагрузке представлены на рис. 5. Из анализа результатов следует, что для поддержания на всасе подпорных насосов ТоТЭЦ требуемого давления 2,5 кгс/см<sup>2</sup> РД должен быть настроен на 6,6 кгс/см<sup>2</sup>. Это давление и в данном случае не превышает определенной техническими условиями величины 7,0 кгс/см<sup>2</sup>. Следует отметить, что подпорные насосы ТоТЭЦ могут нормально функционировать и при давлении 1,4–1,5 кгс/см<sup>2</sup>, следовательно, давление на РД может остаться таким же, как и в предыдущем варианте расчета с существующей нагрузкой (5,5 кгс/см<sup>2</sup>).

В данном случае давление в подающем трубопроводе перед ПНС-3 составляет 9,0 кгс/см<sup>2</sup> при условии, что в напорном коллекторе сетевых насосов ТоТЭЦ давление поддерживается, как и в предыдущем варианте расчета, на уровне 11,5 кгс/см<sup>2</sup>. При этом для обеспечения требуемого давления у потребителей 3-го района ТЭЦ ВАЗ до 10,0 кгс/см<sup>2</sup> возникает необходимость включения повысительных насосов на ПНС-3. Однако возможности насосов ТоТЭЦ позволяют и в этом случае отказаться от включения повысительных насосов ПНС-3. Для этого в подающем трубопроводе на ТоТЭЦ необходимо повысить давление до 12,5 кгс/см<sup>2</sup>. При необходимости увеличения давления в точке 3 до 11 кгс/см<sup>2</sup> давление на ТоТЭЦ должно быть увеличено до 13,5 кгс/см<sup>2</sup>. Режимы работы обратных трубопроводов 2-го и 3-го районов по-прежнему обеспечиваются понизительными насосами ПНС-2 (Н<sub>8</sub>) и ПНС-3 (Н<sub>10</sub>).

Анализ результатов расчетов позволяет заключить, что давления на всех участках теплосети находятся в пределах проектных величин. Исключение составляет лишь давление на участке 10–11, которое снижается до величины, менее 10 кгс/см<sup>2</sup>. Это связано с уменьшением расхода на участке 10–11 ввиду увеличения расхода на ГВС 3-го района ТЭЦ ВАЗ и соответствующего увеличения подпитки контура 4-го вывода ТоТЭЦ.

Как следует из предыдущих расчетов, увеличение нагрузки на 3-й район ТЭЦ ВАЗ приводит к необходимости настройки РД на более высокое давление (с целью поддержания требуемого давления 2,5 кгс/см<sup>2</sup> в обратном трубопроводе ТоТЭЦ), что при наличии понизительных насосов на ПНС-2 (Н<sub>9</sub>) и ПНС-3 (Н<sub>11</sub>) не создает проблем для поддержания заданного режима работы теплосетей 2-го и 3-го районов ТЭЦ ВАЗ.

В статье проведены исследования варианта, при котором нагрузка на 4-м выводе ТоТЭЦ возрастает до 10373 т/ч. Такое ее увеличение возможно в случае, когда ТоТЭЦ полностью обеспечивает перспективную увеличенную нагрузку 5800 т/ч в теплосети 3-го района ТЭЦ ВАЗ, нагрузку 15-й магистрали ТоТС (1573 т/ч) и частично (3000 т/ч) потребности

2-го района ТЭЦ ВАЗ. В данном случае весьма эффективным будет использование резервного трубопровода в качестве второй ветви обратной магистрали на 4-м выводе ТоТЭЦ.

Подпитка, направляемая на ТоТЭЦ, увеличивается до 4900 т/ч. Обратный трубопровод 2-го вывода ТЭЦ ВАЗ такую подпитку обеспечить не может, поэтому он должен быть соединен перемычкой (линия СА на рис. 6) с обратным трубопроводом 1-го вывода. В этой ситуации обратные трубопроводы всех трех выводов ТЭЦ ВАЗ оказываются объединенными по линии САВ.

Расчеты на модели показали, что регулятор давления РД может быть установлен на обратном трубопроводе любого из трех выводов ТЭЦ ВАЗ. Однако, как показали исследования, предпочтительным является вариант установки РД на обратном трубопроводе 2-го вывода. Предпочтительность этого варианта обусловлена его универсальностью, возможностью поэтапной реализации проекта при переходе от малых нагрузок к повышенным, а также наименьшей перегрузкой обратного трубопровода при минимальном водоразборе (в ночное время).

Принятая схема подключения при максимальной нагрузке на ТоТЭЦ требует согласования работы двух независимых источников (ТоТЭЦ и ТЭЦ ВАЗ) на одну прямую магистраль, питающую теплосеть 2-го района ТЭЦ ВАЗ. При этом один из источников должен быть принят в качестве базового с некоторым фиксированным расходом подаваемой воды, что реализуется установкой на его прямой магистрали регулятора расхода РР (рис. 6).

Как и прежде, при максимальной нагрузке на ТоТЭЦ основным параметром регулирования в данном случае является давление на всасе подпорных насосов ТоТЭЦ. Анализ результатов расчетов показывает, что для поддержания на всасе подпорных насосов ТоТЭЦ, например давления  $2,35 \text{ кгс/см}^2$ , РД должен быть настроен на  $6,4 \text{ кгс/см}^2$ , что не превышает заданной техническими условиями величины  $7,0 \text{ кгс/см}^2$ . При этом давление на выходах понизительных насосов ПНС-1 ( $H_7$ ), ПНС-2 ( $H_9$ ) и ПНС-3 ( $H_{11}$ ) не вызывает проблем при их работе.

Расчеты показали, что для поддержания в точке соединения прямых трубопроводов 4-го вывода ТоТЭЦ и 2-го вывода ТЭЦ ВАЗ давления  $11 \text{ кгс/см}^2$  давление на 4-м выводе (на выходе из ТоТЭЦ) должно быть не менее  $16 \text{ кгс/см}^2$ . Такое давление является предельным для ТоТЭЦ. Поэтому на подающем трубопроводе 4-го вывода ТоТЭЦ необходимо предусмотреть повысительную насосную ПН (рис. 6).

## ВЫВОДЫ

1. Наиболее простым вариантом объединения вновь проектируемого тепловывода ТоТЭЦ с теплосетями, запитываемыми от ТЭЦ ВАЗ, является вариант с установкой перемычки 16–28 между обратными трубопроводами теплосетей 2-го и 3-го выводов ТЭЦ ВАЗ. Однако расчеты на компьютерной модели показали, что давления в точках 16, 28, 34 обратных трубопроводов будут недостаточны для нормального функционирования теплосетей. Для повышения давления в этих точках на обратном трубопроводе 2-го вывода ТЭЦ ВАЗ на участке между точками 16–17 необходимо уста-

новить регулятор давления, который может располагаться на обратном трубопроводе любого из трех выводов ТЭЦ ВАЗ. Однако предпочтительным является вариант установки регулятора давления на обратном трубопроводе 2-го вывода. Предпочтительность этого варианта обусловлена его универсальностью, возможностью поэтапной реализации проекта при переходе от малых нагрузок к повышенным, а также наименьшей перегрузкой обратного трубопровода при минимальном водоразборе (например, в ночное время).

2. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что при запитке одних и тех же потребителей от двух источников теплоты, имеющих различные схемы теплоснабжения, возникает ряд проблем, без решения которых объединенная теплосеть на отдельных режимах работы может оказаться вообще неработоспособной. Среди таких проблем наиболее важными являются определение оптимального расположения регуляторов давления и расхода, повысительных и понизительных насосных, а также поддержание с их помощью заданных техническими условиями на проектирование параметров по давлению и расходу среды в различных точках сети. Кроме того, необходимо рассмотреть работоспособность принятой схемы компоновки объединенной теплосети на всех возможных режимах работы, варьируя расходные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов, Е. Я. Теплофикация и тепловые сети / Е. Я. Соколов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 360 с.
2. Расчет гидравлических и температурных режимов работы теплосети Самарской ТЭЦ с помощью компьютерной модели / Ю. С. Панамарев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2005. – № 5. – С. 35–39.
3. Кудинов, И. В. Использование компьютерных моделей для проектирования тепловых сетей / И. В. Кудинов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 4. – С. 174–182.
4. Работа компьютерной модели и исследование работы циркуляционной системы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 / В. А. Кудинов [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 118–124.
5. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ на компьютерной модели / С. В. Колесников [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 6. – С. 90–95.
6. Работа компьютерной модели и расчет оптимальных режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» / Н. А. Зройчиков [и др.] // Теплоэнергетика. – 2007. – № 11. – С. 14–21.
7. Кудинов, И. В. Построение компьютерных моделей систем теплоснабжения больших городов / И. В. Кудинов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1 (29). – С. 212–219.
8. Зыков, А. А. Теория конечных графов / А. А. Зыков. – Новосибирск: Наука, 1969. – 543 с.
9. Коваленко, А. Г. Система синтеза и анализа гидравлических сетей / А. Г. Коваленко, Н. С. Туева. – М.: Вычисл. центр АН СССР, 1972. – 70 с.
10. Абрамов, Н. Н. Теория и методика расчета системы подачи и распределения воды / Н. Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1972. – 286 с.

#### REFERENCES

1. Sokolov, E. Ya. (1963) *Heating and Heat Networks*. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat. 360 p. (in Russian).
2. Panamarev, Yu. S., Kudinov, V. A., Chilikin, Iu. P., & Kotov, B. V. (2005) Computation of Hydraulic and Temperature Regimes of Heat Network Operation of Samara Central

Thermal Station with the Help Computer Model. *Teploenergetika* [Heat Engineering], 5, 35–39 (in Russian).

3. K u d i n o v, I. V. (2010) Using of Computer Models for Heat Networks Design. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. "Tekhnicheskie Nauki"* [Bulletin of Samara State Technical University. Series "Technical Sciences"], 4, 174–182 (in Russian).

4. K u d i n o v, V. A., Kolesnikov, S. V., Kovalenko, A. G., & Ponomarev, Iu. S. (2001) Development of Computer Model and Investigation of Circulation System Operation of Novokujbysh Thermoelectric Plant-2. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii Nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 6, 118–124 (in Russian).

5. K o l e s n i k o v, S. V., Dikop, V. V., Tomkin, S. V., & Kudinov, V. A. (2002) Investigation of Hydraulic Regimes of Circulation System Operation of Tolyatti Thermoelectric Plant, Using Computer Models. *Izvestiia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii – Energetika* [Proceedings of the Higher Education Institutions and Power Engineering Associations – Power Engineering], 6, 90–95 (in Russian).

6. Z r o y c h i k o v, N. A., Kudinov, V. A., Kovalenko, A. G., Kolesnikov, S. V., Moskvina, A. G., & Lisitsa, V. I. (2007) Development of Computer Model and Calculation of Optimal Regimes of Circulation System Operation of Thermoelectric Plant-23 Open Joint-Stock Company "Mosenergo". *Teploenergetika* [Power Engineering], 11, 14–21 (in Russian).

7. K u d i n o v, I. V. (2011) Making of Computer Models of Heat Supply Systems. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Ser. "Tekhnicheskie Nauki"* [Bulletin of Samara State Technical University. Series "Technical Sciences"], 1 (29), 212–219 (in Russian).

8. Z y k o v, A. A. (1969) Theory of Finite Graphs. Novosibirsk, Science. 543 p. (in Russian).

9. K o v a l e n k o, A. G., & Tueva N. S. (1972) System of Synthesis and Analysis of Hydraulic Networks. Moscow, Computer Center of the Academy of Science of USSR. 70 p. (in Russian).

10. A b r a m o v, N. N. (1972) Theory and Computation Methods of Water Supply and Distribution System. Moscow, Strojizdat. 286 p. (in Russian).

Представлена кафедрой  
теоретических основ теплотехники  
и гидромеханики

Поступила 17.04.2013

УДК 66.096.5

## СТРУКТУРА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО СЛОЯ

Докт. техн. наук, проф. БОКУН И. А.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: fes@bntu.by

Предложена структура пульсирующего слоя, представляющего собой состояние дисперсного материала, который продувается прерывистым газовым потоком со скоростью, достаточной, чтобы привести его в состояние движения. При этом слой в течение одного цикла находится во взвешенном, падающем и неподвижном состояниях, что изменяет укладку частиц, пути прохода газа через слой, позволяет осуществить эффективный межфазовый теплообмен даже несипучих непсевдоожигающихся зернистых материалов.

Рассмотрены процесс образования ударных струй и их влияние на образование пузырей в пульсирующем слое. При включении дутья нарушается баланс между силой гидродинамического сопротивления, с одной стороны, и