

УДК 536. 2 (075)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ДВИЖУЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ*

С.В. Колесников, А.Н. Бранфилева, Л.С. Абишева, А.В. Федотенкова

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: totig@yandex.ru

Разработана математическая и компьютерная модель теплосети централизованного теплоснабжения г. Самары, запитываемой от Самарской ТЭЦ. При разработке модели использована электрогидравлическая аналогия, в основе которой лежат два закона Кирхгофа, применяемые в расчетах электрических сетей. В отличие от известных методов математического моделирования гидравлических процессов, основанных на электрогидравлической аналогии, в настоящей работе применен метод автоматической идентификации модели, позволяющий выполнить ее максимальное приближение к реальной сети по гидравлическому сопротивлению. Такой подход, несмотря на усложнение расчетов, позволяет получить модель, отличающуюся от реальной теплосети не более чем на 3–5 % в зависимости от числа используемых при выполнении идентификации экспериментальных данных. Выполненные на модели исследования позволили разработать рекомендации по изменению режимов работы теплосетей, а также рассчитать оптимальные планы их реконструкции и построения новых участков.

Ключевые слова: тепловые сети, электрогидравлическая аналогия, математическая и компьютерная модель, законы Кирхгофа, теория графов, идентификация компьютерной модели.

Математическое и компьютерное моделирование процессов переноса тепла, массы и импульса является неотъемлемым компонентом многих научных и прикладных исследований, охватывающих широкие области использования в различных отраслях промышленности. Математические модели указанных процессов основаны на дифференциальных уравнениях Навье – Стокса и конвективного теплообмена, которые, несмотря на многочисленные допущения, крайне сложны и могут быть исследованы лишь численными методами. В этой связи весьма перспективным является направление моделирования, связанное с применением теории подобия, когда исследование каких-либо процессов выполняется на объ-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО "СамГТУ" (код проекта: 1273).

Сергей Владимирович Колесников (к.т.н.), докторант кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».

Бранфилева Анастасия Николаевна, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика».

Абишева Любовь Сергеевна, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», аспирант.

Федотенкова Анна Владимировна, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика», аспирант.

ектах (явлениях) совсем другой природы, которые описываются теми же уравнениями, что и исследуемые процессы. Например, уравнения двух законов Кирхгофа, описывающих распределение потенциалов в электрических сетях, могут быть успешно использованы для нахождения давлений и скоростей (расходов) в движущихся жидкостях ввиду аналогии электрических и гидравлических процессов.

Движение среды, транспортируемой в трубопроводах, происходит в соответствии с законами сохранения массы, энергии и импульса. Поэтому теория гидравлических систем основывается на математическом моделировании различных параметров, характеризующих перемещаемую среду. Теория гидравлических сетей, основанная на электрогидравлической аналогии, развивалась в работах Сухарева М.Г., Ставровского Е.Р., Меренкова А.П., Хасилева В.Я., Коваленко А.Г., Соколова Е.Я. и др. [1–16]. В их работах приводится обоснование математических моделей, описывающих гидравлические процессы в трубопроводных системах, дается алгоритмическое обеспечение применения теории графов, алгебры матриц и векторов.

Основой теории гидравлических сетей является метод расчета потокораспределения, основные положения которого приведены в [4]. В этой работе даны теоретические положения, связанные с применением законов Кирхгофа к расчету гидравлических сетей. Распространение этого метода для расчетов многокольцевых трубопроводных систем связано с расчетными трудностями, для преодоления которых были разработаны соответствующие алгоритмы и компьютерные программы, основанные на использовании итеративных методов расчета увязочных расходов. Однако для сложных сетей появляется проблема сходимости итераций.

Идею метода поясним на примере нахождения распределения расходов в сети, состоящей из кольца, которое имеет три ответвления (рис. 1). По участкам a , b , c , d расходы обозначим через Q_a , Q_b , Q_c , Q_d – по ответвлениям Q_1 , Q_2 , Q_3 . Требуется найти расходы по участкам кольца при известном расходе Q , задаваемом на входе в кольцо. Расходы Q_1 , Q_2 , Q_3 по ответвлениям заданы, и сумма их равна расходу на входе в кольцо $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$.

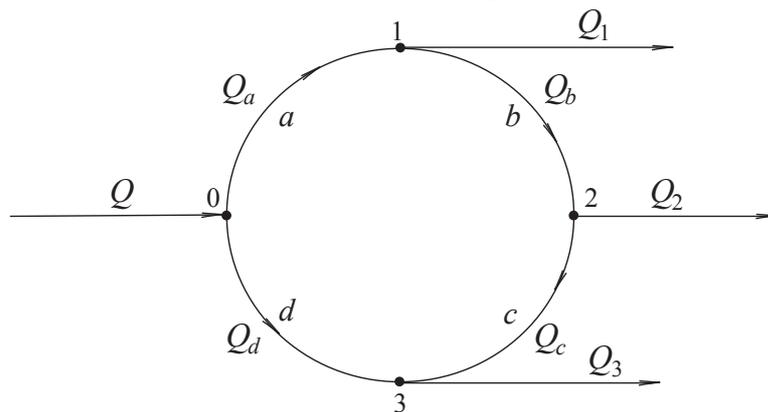


Рис. 1. Схема кольцевой сети

Введем следующие допущения: 1) поступление среды в узел считаем положительным, а отток – отрицательным; 2) потеря напора для среды, движущейся

по часовой стрелке, положительна, против – отрицательна.

По первому закону Кирхгофа при расчетах гидравлических сетей должно выполняться равенство поступления и оттока в любом узле

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

где n – число соединяющихся в узле трубопроводов;

Q_i ($i = \overline{1, n}$) – расходы по любому из трубопроводов.

По второму закону Кирхгофа для каждого замкнутого контура сумму напоров следует приравнять нулю:

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

где S_i ($i = \overline{1, n}$), Q_i ($i = \overline{1, n}$) – гидравлические сопротивления и расходы на i -том участке.

Применяя итеративный метод расчета, на основе (1) и (2) можно определить расходы по участкам сети при заданном расходе Q на входе в кольцо. Первый шаг итерации связан с заданием произвольных расходов Q_a, Q_b, Q_c, Q_d на каждом участке кольца. Отсюда в узлах 0, 1, 2 исходя из первого закона Кирхгофа определяем

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

Запись уравнения Кирхгофа для узла 3 не требуется, так как расход $Q_3 = Q_d + Q_c$ при известных значениях расходов на других участках сети d и c .

Используя принятые расходы, по второму закону Кирхгофа находим невязки напоров:

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

Если δH положительна, то, следовательно, перегружены участки с направлением движения по часовой стрелке и недогружены те, где направление движения противоположно. Чтобы приблизить невязку напоров δH к нулю, вводится увязочный расход δQ . Он вычитается из расхода на перегруженных и добавляется – на недогруженных участках. Увязочный расход δQ можно найти из (3), положив $\delta H = 0$. Считая, что невязка, найденная из (3), положительна, увязочный расход δQ определяем по соотношению

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

Пренебрегая членами $(\delta Q)^2$, считая их малыми величинами, соотношение (4) относительно δQ приводим к алгебраическому линейному уравнению. Его решение

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

где $\sum_{i=1}^n S_i Q_i = S_a Q_a + S_b Q_b + S_c Q_c + S_d Q_d$ – всегда положительная величина. Знаки δQ и δH всегда одинаковые.

После определения δQ расходы на участках кольца уточняются и расчет

вновь повторяется. Итерации выполняются до тех пор, пока определяемые из двух последних расчетов расходы не будут отличаться на некоторую весьма малую (заданную) величину.

В качестве примера найдем расходы по участкам кольца для исходных данных:

$$\begin{aligned} Q &= 60 \text{ м}^3/\text{ч}; S_a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мч}^2/\text{м}^6; S_b = 2 \cdot 10^{-5} \text{ мч}^2/\text{м}^6; \\ S_c &= 8 \cdot 10^{-5} \text{ мч}^2/\text{м}^6; S_d = 4 \cdot 10^{-5} \text{ мч}^2/\text{м}^6; Q_1 = 15 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_2 = 25 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ Q_3 &= 20 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$

Первый шаг итерации состоит в принятии некоторых произвольных расходов по участкам кольца

$$Q_a = 50 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 35 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_c = 10 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 10 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Из формулы (3) находим

$$\delta H = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 50^2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 35^2 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^{-5} \cdot 10^2 = 0,1535 \text{ м}. \quad (6)$$

Увязочный расход находится по соотношению (5)

$$\delta Q = 0,1535 / [2 \cdot (5 \cdot 10^{-5} \cdot 50 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot 35 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot 10 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot 10)] = 17,47 \text{ м}. \quad (7)$$

На втором итеративном шаге по участкам кольца

$$\begin{aligned} Q_a &= 50 - 17,47 = 32,53 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 35 - 17,47 = 17,53 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ Q_c &= 10 - 17,47 = -7,47 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 10 + 17,47 = 27,47 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$

Отрицательный знак расхода $Q_c = 10 - 17,47 = -7,47 \text{ м}^3/\text{ч}$ означает, что направление движения жидкости, принятое на первом итеративном шаге, нужно сменить на противоположное, то есть расход на данном участке нужно принять положительным.

Отсюда получаем $\delta H = 0,024408 \text{ м}$; $\delta Q = 3,32 \text{ м}^3/\text{ч}$.

После уточнения расходов по участкам определяем

$$\begin{aligned} Q_a &= 32,5 - 3,32 = 29,21 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 17,53 - 3,32 = 14,21 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ Q_c &= 7,47 + 3,32 = 10,79 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 27,47 + 3,32 = 30,79 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$

Величины δH и δQ третьего шага итерации, определяемые из соотношений (3) и (5), будут $\delta H = 0,0074 \text{ м}$; $\delta Q = 1,1 \text{ м}^3/\text{ч}$.

На основе результатов третьей итерации уточняются расходы по участкам кольца:

$$Q_a = 28,11 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_b = 13,11 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_c = 11,89 \text{ м}^3/\text{ч}; Q_d = 31,89 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Проверяя выполнение первого уравнения Кирхгофа, применительно к 1-му, 2-му и 3-му узлам кольца получаем:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_a - Q_b = 28,11 - 13,11 = 15 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ Q_2 &= Q_b + Q_c = 13,11 + 11,89 = 25 \text{ м}^3/\text{ч}; \\ Q_3 &= Q_d - Q_c = 31,89 - 11,89 = 20 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$

Следовательно, уже на третьем шаге итерации найдены расходы по участкам кольца, отличающиеся от заданных расходов для абонентов Q_1 , Q_2 , Q_3 , с точностью до первого знака после запятой.

При большом количестве колец в сети процесс выполнения итераций является плохо сходящимся. В связи с этим существенно возрастают затраты време-

ни, необходимого на выполнение расчетов. Поэтому для сложных гидравлических цепей применение изложенной выше последовательности расчета потоко-распределения возможно лишь при использовании современных средств компьютерной техники. Однако прежде чем переходить к расчетам на компьютерах, необходимо разработать компьютерную модель сети, в которой наряду с законами Кирхгофа применяется также теория графов [16]. На ее основе строится «дерево» теплосети. Схема графа дана на рис. 2, где цифрами 1, 2, 3, ..., 9 обозначены вершины, *a, б, в, ...* – дуги. Вершины графа представляют точки объединения трубопроводов, а дуги – участки трубопроводов. «Дерево» теплосети строится так, чтобы из вершины графа 1 можно было достичь любой другой вершины.

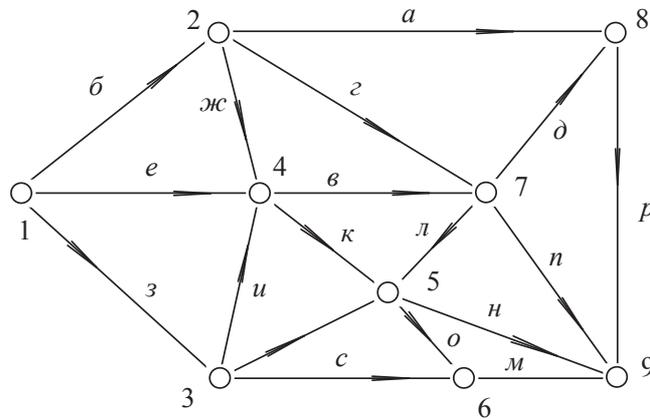


Рис. 2. Схема графа

Таким путем выполняется рассмотрение теплосети как единой системы. Для выполнения расчетов используется особая нумерация вершин и дуг. Любая вершина (узел) отмечается номером (именем), высотой расположения, величиной поступления или оттока среды и др. Любая дуга имеет номер (имя), длину и диаметры труб, коэффициент трения и другие параметры.

Формул (3) и (5) достаточно для нахождения системы уравнений для неизвестных расходов и давлений. Ввиду итеративного способа расчета для сложных теплосетей появляется проблема сходимости итераций. В расчетной практике благодаря быстрой сходимости итераций получил распространение способ поконтурной увязки перепада давлений, реализация которого состоит в следующем:

- задается начальное значение расходов на всех ветвях схемы;
- находятся потери давления в ветвях и их невязки для контуров;
- по найденным невязкам определяются значения «увязочных расходов»;
- все «увязочные расходы» определяются по всем ответвлениям каждого контура путем алгебраического суммирования расходов, принятых в начальном приближении.

Найденные на последнем этапе расходы используются в качестве следующего приближения, вплоть до совпадения (в пределах задаваемой точности) значений всех искомых величин.

Для создания компьютерной модели следует определять гидравлические ха-

рактеристики трубопроводов. Потери напора в трубопроводе включают потери на трение (линейные) и потери в местных сопротивлениях:

$$\Delta h = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} + \sum \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (8)$$

где Δh – потери напора, m ;
 λ – коэффициент трения;
 l – длина трубопровода, m ;
 d – внутренний диаметр, m ;
 v – средняя скорость, m/c ;
 $\sum \xi$ – сумма коэффициентов местных потерь на участке, m ;
 g – ускорение силы тяжести, m/c^2 .

Если ввести эквивалентную длину, то потери в местных сопротивлениях сводятся к линейным с расчетом эквивалентной длины местных сопротивлений по соотношению

$$l_3 = d \sum \xi / \lambda. \quad (9)$$

Формула (8) с учетом (9) будет выглядеть так:

$$\Delta h = \frac{v^2}{2g} \left(\lambda \frac{l}{d} + \lambda \frac{l_3}{d} \right) = \frac{\lambda v^2}{2dg} (l + l_3). \quad (10)$$

Скорость по известному расходу жидкости Q на участке сети будет

$$v = 4Q / (\pi d^2). \quad (11)$$

После подстановки (11) в (10) будем иметь

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

Отсюда для участка-трубы гидравлическая характеристика принимает вид

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

где $s = 8\lambda(l + l_3) / (\pi^2 g d^5)$ – гидравлическое сопротивление участка, c^2/m^5 .

Для каждого участка-трубы вводится следующая информация: диаметр; длина; информация о местных сопротивлениях.

Для каждого участка-задвижки гидравлическая характеристика имеет вид

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

где s – коэффициент, который для полностью открытой задвижки принимается равным 0,07.

В компьютерной модели используются также участки-насосы, которые представлены зависимостями, связывающими напор насоса и его подачу. Характеристика насоса с достаточной точностью определяется соотношением вида

$$H = H_\phi - Q_H^m S_\phi,$$

где H_ϕ – напор насоса при закрытой на его выходе задвижке $Q_H = 0$, m ; Q_H – подача насоса, m^3/c ; S_ϕ – гидравлическое сопротивление насоса, kg/m^3 .

Величина m принимается равной 2 или 1,85 исходя из характеристики насоса. Параметры H_ϕ и S_ϕ находятся по двум произвольным точкам известной характеристики насоса с использованием соотношений

$$S_{\phi} = \frac{H_a - H_b}{Q_b^2 - Q_a^2}; \quad H_{\phi} = H_a - S_{\phi} Q_a^2,$$

где индексы a и b означают параметры H и Q , взятые из паспортных данных.

По описанному выше алгоритму создается модель с паспортными характеристиками. Однако действительные характеристики сети могут отличаться от паспортных. Для максимального приближения модели к реальной сети выполняется ее идентификация [1–3]. При этом используются экспериментальные замеры расходов и давлений в отдельных точках гидравлической сети. Для приближения модели к реальной сети гидравлические сопротивления ее участков изменяют так, чтобы результаты, получаемые на модели, как можно менее отличались от экспериментальных данных. Процесс идентификации – итеративный. Выполнение этого процесса в модели автоматизировано. Точность идентификации определяется точностью и количеством экспериментальных данных. Отметим, что при проектировании новых гидравлических сетей идентификация модели не выполняется.

Принципиальная схема части теплосети г. Самары, запитываемой от Самарской ТЭЦ, дана на рис. 3. Три вывода СамГЭЦ имеют общую нагрузку около 17040 *т/час* (первый вывод – 7760 *т/час*, второй – 4600 *т/час*, третий – 4640 *т/час*). Отметка высоты станции 75 м. Установленная тепловая мощность составляет 1500 *Гкал/час*. Большая длина трубопроводов (около 10 км – первый и третий выводы и около 6 км – второй) и недостаточный их диаметр приводят на отдельных участках тепловыводов к недостаточному располагаемому перепаду давлений. В связи с этим необходимо использовать повысительные насосные НС-12 на первом и НС-11 на третьем выводах. Повышенные давления в обратных трубопроводах (60 м и более) наблюдаются на пониженных участках теплосети.

На рис. 4–8 приведены эпюры полученных на модели давлений для различных путей (ответвлений) тепловыводов. Из их анализа можно заключить, что на первом и третьем выводах (см. рис. 4, 7, 8) практически исчерпаны резервы по мощности повысительных насосных НС-11 и НС-12, так как они работают на пределе величин по пьезометрическому давлению в прямом трубопроводе (около 240 м). В связи с этим для увеличения располагаемого перепада давлений между прямым и обратным трубопроводами необходима их реконструкция на участке первого вывода от НС-12 до К-30 длиной 1,5 км, связанная с изменением диаметров трубопроводов с 800 до 1200 мм.

Это мероприятие позволит поднять располагаемый перепад давлений на 30 м. Кроме того, необходимо реконструировать участок трубопроводов третьего вывода от НС-11 до К-45 длиной 3 км с увеличением диаметров с 800 до 1200 мм, что позволит повысить располагаемый перепад давлений на 50 м. Только после проведения указанных реконструкций можно рассчитывать на существенное увеличение нагрузки на первом и третьем выводах. Значительно более благоприятные условия работы имеются на втором выводе СамГЭЦ (рис. 5, 6). Это связано с относительно небольшой нагрузкой на входе ($G = 4600$ *т/час*) и почти в 2 раза меньшими, чем на первом и третьем выводах, длинами трубопроводов при достаточно больших диаметрах. Поэтому располагаемый перепад давлений не опускается ниже 40 м, в связи с чем тепловая нагрузка на втором выводе может быть существенно увеличена, например путем передачи части нагрузки первого и третьего выводов.

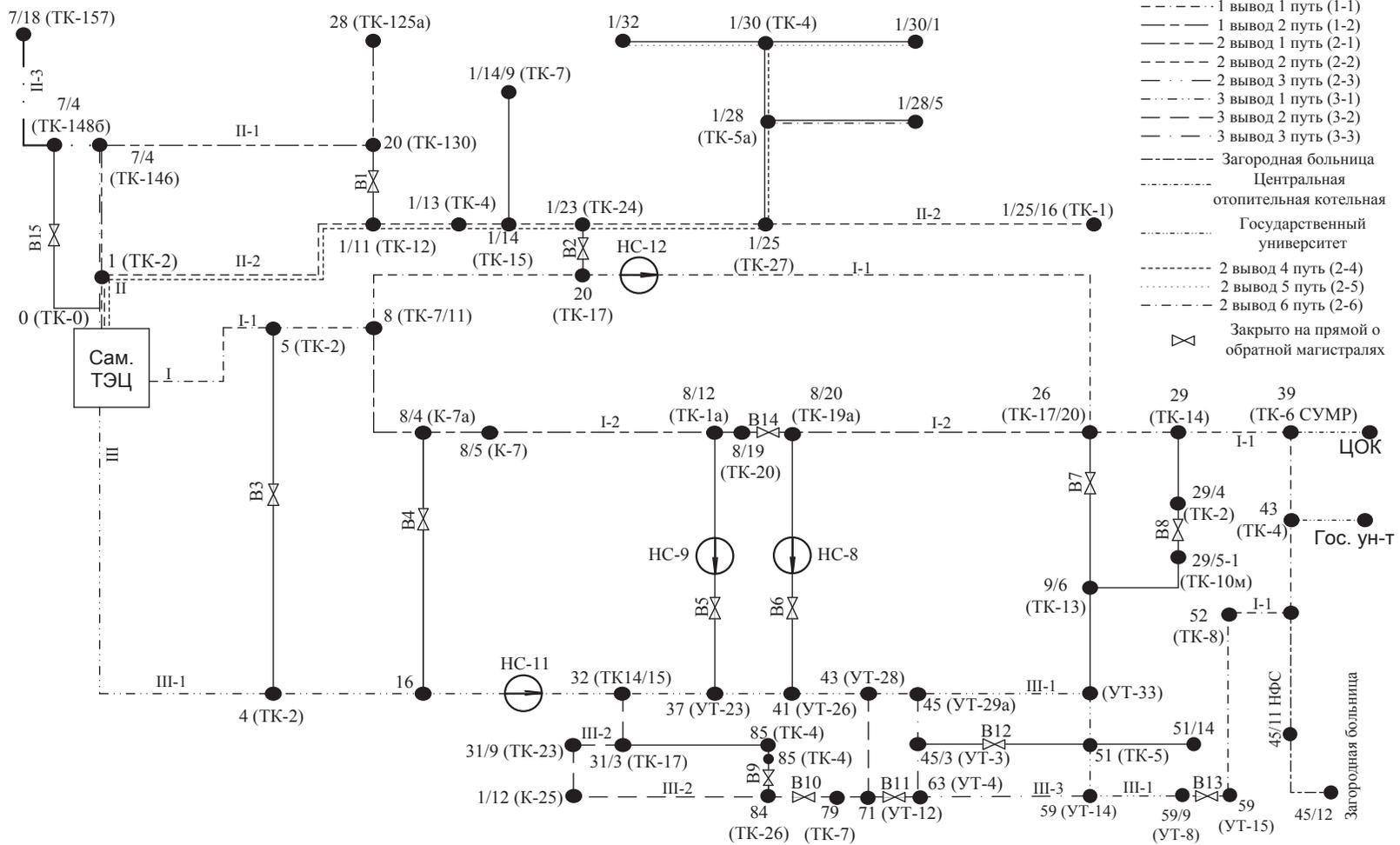


Рис. 3. Схема тепловой сети от Самарской ТЭЦ (I, II, III тепловыводы). II повысительные насосные станции HC-1, HC-12 включены, HC-8, HC-9, HC-10 – отключены

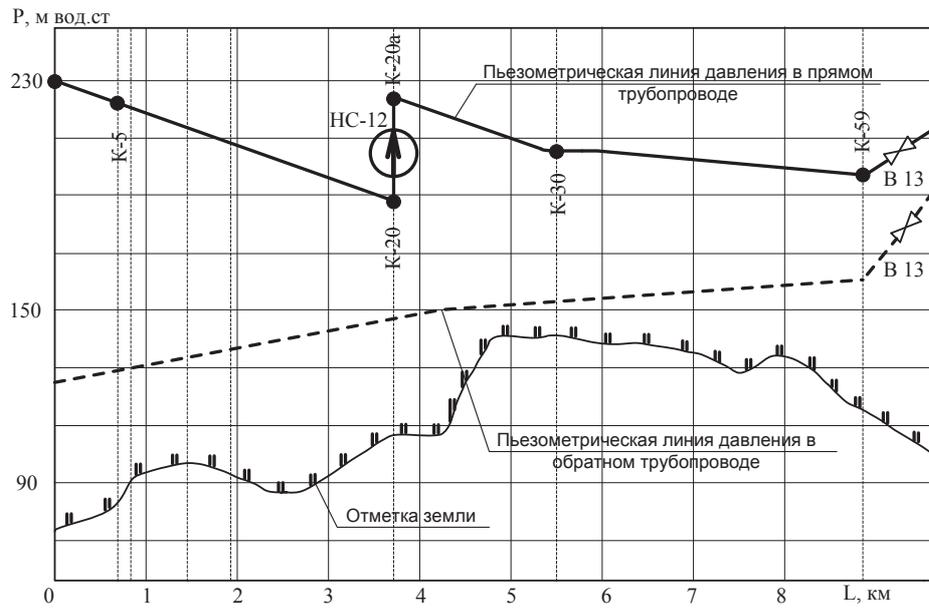


Рис. 4. Первый тепловывод, первый путь. Реальное состояние. Задвижка В 13 закрыта

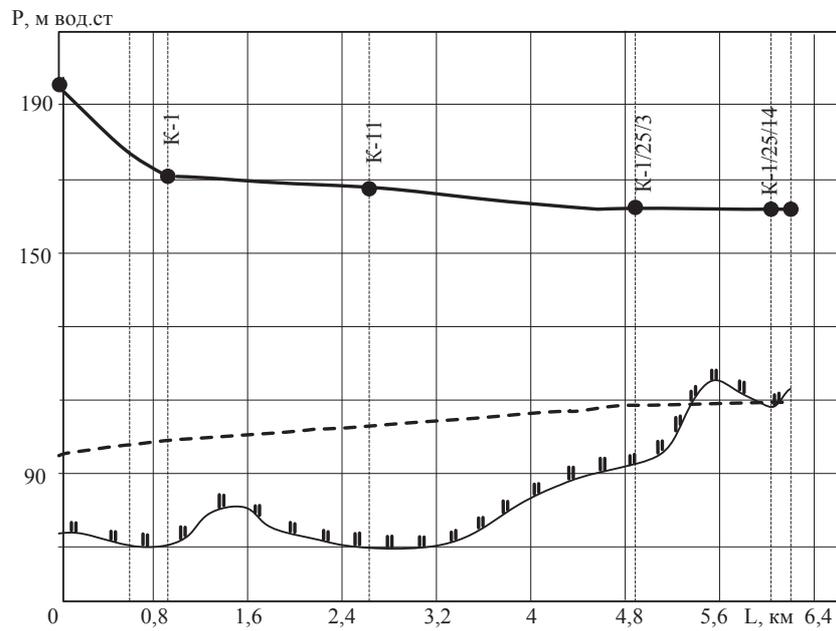


Рис. 5. Второй тепловывод, второй путь. Реальное состояние

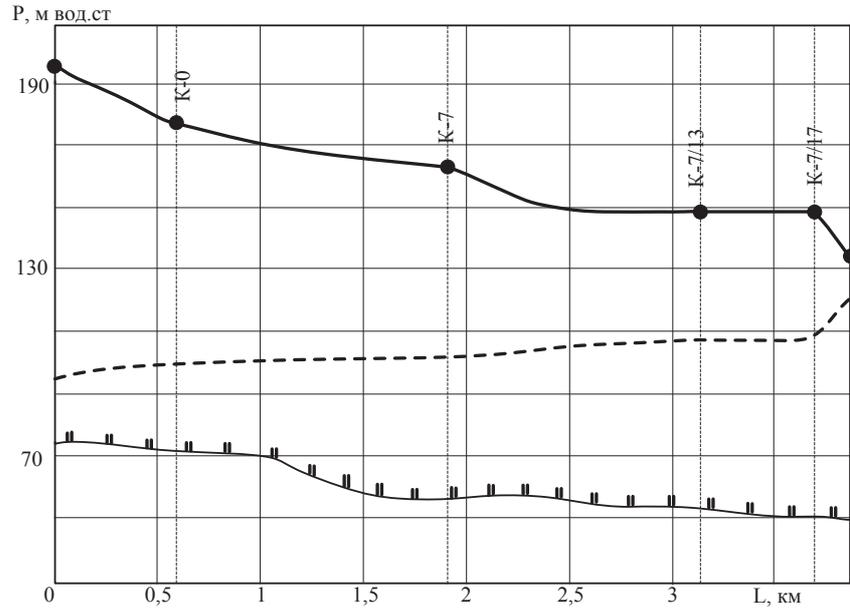


Рис. 6. Второй тепловывод, третий путь. Реальное состояние

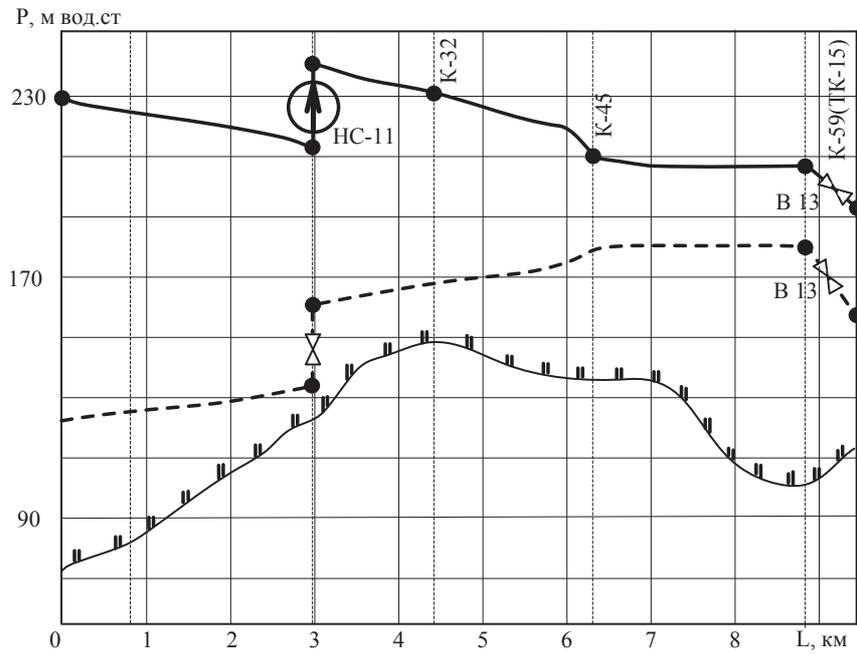


Рис. 7. Третий вывод, первый путь. Повысительная насосная НС-11 включена

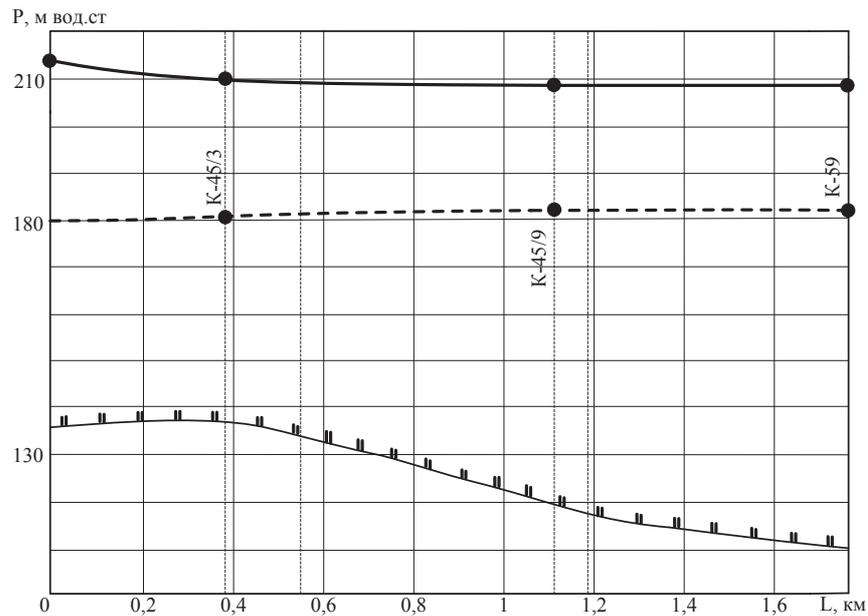


Рис. 8. Третий вывод, третий путь

Выводы

С использованием электрогидравлической аналогии разработана математическая и компьютерная модель теплосети централизованного теплоснабжения г. Самары, запитываемой от Самарской ТЭЦ, позволяющая выполнять расчеты давлений, скоростей, расходов, потерь напора, затрат энергии на перемещение теплоносителя, рассматривая теплосеть как единую гидравлическую систему.

Для максимального приближения модели к реальной теплосети применен метод автоматической идентификации, основанный на итеративном изменении гидравлических сопротивлений отдельных участков с таким расчетом, чтобы получаемые на модели результаты наименее отличались от известных экспериментальных данных по давлению в некоторых точках теплосети. Показано, что точность идентификации в зависимости от используемого числа экспериментальных данных составляет 3–5 %.

Выполненные на модели исследования позволили указать участки теплосети, на которых с целью повышения расходных характеристик необходимо провести реконструкцию, связанную с увеличением диаметров трубопроводов. Были также выполнены расчеты, позволяющие оценить возможности принятия дополнительной перспективной нагрузки на всех тепловыводах Самарской ТЭЦ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коваленко А.Г., Туева К.С. Система синтеза и анализа гидравлических сетей. – Вычисл. центр АН СССР, 1989. – 70 с.
2. Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников С.В., Панамарев Ю.С. Разработка компьютерной модели и исследование работы циркуляционной системы Новокуйбышевской ТЭЦ-2 // Изв. АН. Энергетика. – 2001. – № 6. – С. 118-124.
3. Зройчиков Н.А., Кудинов В.А., Коваленко А.Г., Колесников С.В., Москвин А.Г., Лисица В.И. Разработка компьютерной модели и расчет оптимальных режимов работы циркуляционной системы ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. – 2007. – № 12. – С. 7-15.
4. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Энергоиздат, 1982. – 360 с.
5. Колесников С.В., Дикоп В.В., Томкин С.В., Кудинов В.А. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционной системы Тольяттинской ТЭЦ на компьютерной модели // Известия высших

- учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2002. – № 6. – С. 90.
6. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
 7. Колесников С.В. Исследование тольяттинских тепловых сетей на компьютерной модели // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2014. – № 2 (42). – С. 136-147.
 8. Меренков А.П. Дифференциация методов расчета гидравлических сетей // Журнал вычисл. математики и мат. физики. – 1973. – Т. 13. – № 5. – С. 1237-1248.
 9. Дикоп В.В., Алфеев А.А., Кудинов В.А., Кудинов А.А., Исаев А.Е. Устройство для обратного водоснабжения электростанций с градирнями. Патент на изобретение. RUS 2236517. 26.2002.
 10. Меренков А.П. Применение ЭВМ для оптимизации разветвленных тепловых сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1963. – № 4. – С. 531-538.
 11. Меренков А.П. и др. Применение теории и методов расчета гидравлических цепей к системам с неизотермическим течением газа // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1971. – № 6. – С. 129-138.
 12. Сухарев М.Г. Об одном методе расчета газосборных сетей на вычислительных машинах // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1965. – № 6. – С. 48-52.
 13. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Оптимизация систем транспорта газа. – М.: Недра, 1975. – 278 с.
 14. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Расчеты систем транспорта газа с помощью вычислительных машин. – М., 1971. – 206 с.
 15. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. – Новосибирск: Наука, 1983. – 167 с.
 16. Сумароков С.В. Метод решения многоэкстремальной сетевой задачи // Экономика и мат. методы. – 1976. – Т. 12. – № 5. – С. 1016-1018.
 17. Зыков А.А. Теория конечных графов. – М.: Наука, СО, 1969. – 543 с.

Статья поступила в редакцию 11 июня 2015 г.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PRESSURE DISTRIBUTION IN A MOVING FLUID BASED ON ELECTRO – HYDRAULIC ANALOGY

S.V. Kolesnikov, A.N. Branfileva, L.S. Abisheva, A.V. Fedotenkova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The mathematical and computer model of heating network for Samara District heating system powered from Samara TPP is developed. The electro-hydraulic analogy based on two Kirchhoff's laws that are applied in the calculation of electrical networks is used. In contrast to known methods of mathematical modeling of hydraulic processes based on electro-hydraulic analogy, in this study we applied a method of automatic identification of the model which allows to perform close approximation to real network hydraulic resistance. This approach, despite the complexity of calculations, provides a model which differs from the actual heating system by not more than 3-5%, depending on the number of experimental data used in carrying out the identification. Performed research allowed to develop the recommendations for changing of the operation modes of heating systems as well as calculate the optimal plans for their reconstruction and the construction of new sites.

Keywords: *heating networks, electro-hydraulic analogy, mathematical and computer models, the laws of Kirchhoff, graph theory, the identification of a computer model.*

Sergey V. Kolesnikov (Ph.D. (Techn.)), Doctoral Candidate.

Anastasiya N. Branfileva, Assistant.

Lubov S. Abisheva, Assistant, Postgraduate Student.

Anna V. Fedotenkova, Assistant, Postgraduate Student.