

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ГОРОДОВ

И.В. Кудинов

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

Разработана компьютерная модель теплосети централизованного теплоснабжения г. Саратова от ГРЭС и ТЭЦ-5, позволяющая определять скорости, расходы и давление теплоносителя на любых участках сети. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по изменению режимов работы теплосети и реконструкции отдельных ее участков. Сформулированы также некоторые положения, характерные и для многих других теплосетей.

Ключевые слова: компьютерная модель, теория графов, законы Кирхгофа, теплосети, энтюры давлений.

В практике эксплуатации сложных разветвленных тепловых сетей основными проблемами являются недостаточный перепад давлений между прямым и обратным трубопроводами, повышенное давление в обратном трубопроводе, разрегулированность сети (несоответствие расчетных и действительных расходов) у потребителей теплоты и другие. Причины этих проблем следующие: повышенный расход теплоносителя, недостаточные диаметры трубопроводов, уменьшение диаметров труб из-за отложений на их внутренних поверхностях, перекрытие задвижек на участках сети с большими скоростями течения теплоносителя, «паразитные» циркуляции и прочее. Решение вопроса о том, какая из этих причин является определяющей, представляется довольно сложной проблемой.

Эффективным средством для наиболее достоверного определения причин указанных выше проблем являются компьютерные модели, позволяющие полностью воспроизводить гидравлические режимы работы теплосетей, рассматривая их как единые, целые системы.

В основе расчета сложных кольцевых гидравлических систем лежат два условия, аналогичные требованиям к расчету электрических сетей.

Первое условие – соблюдение уравнения баланса расходов, т. е. равенства притока и оттока воды в каждом узле:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0.$$

В эту сумму входят как расходы, отбираемые в узле, так и расходы, проходящие транзитом по линиям. Первое условие иногда формулируется так: приток воды к узлу должен равняться оттоку.

Второе условие – равенство нулю потерь напора при обходе каждого кольца:

$$\sum_{i=1}^k h_i = 0.$$

Потери считаются положительными, если направление обхода совпадает с направлением движения воды, и отрицательным, если эти направления не совпадают.

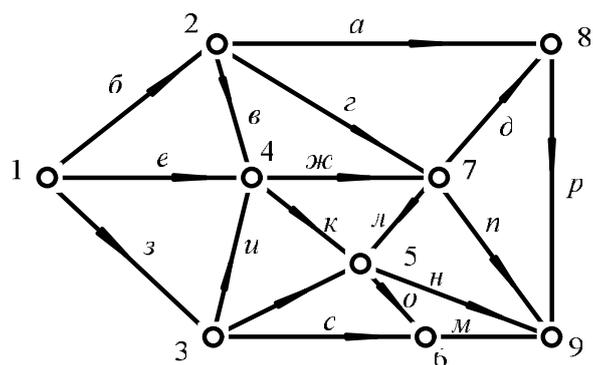
Рассмотренных соотношений формально достаточно для построения замкнутой системы уравнений относительно неизвестных расходов в ветвях сети и давлений в ее узлах. Однако система уравнений получается нелинейной, и даже в простейшем случае при квадратичном законе сопротивления трудно получить ее точное решение. Поэтому в основе существующих методов расчета сложных кольцевых сетей лежат алгоритмы итерационного характера. Наиболее распространен в расчетной практике, благодаря относительно быстрой сходимости, метод поконтурной увязки перепадов давлений. Принципиально его содержание сводится к следующему. Задается некоторое начальное приближение для расходов на всех ветвях расчетной многоконтурной схемы, но такое, чтобы во всех узлах соблюдалось первое условие. Затем вычисляются потери давления на всех ветвях и их суммарные невязки во всех независимых контурах. По выявленным невязкам тем или иным образом определяются величины так называемых контурных «узловых расходов». Каждый увязочный расход «проводится» по всем ветвям своего контура алгебраическим суммированием с расходами, принятыми по начальному приближению.

Расходы, полученные на последнем этапе, используются в качестве очередного приближения для начала следующей итерации вплоть до совпадения (в пределах заданной погрешности) значений всех или части искомым величин.

Данный алгоритм реализует компьютерная программа, основанная на теории графов. Пусть $G = (E, V, H)$ – конечный ориентированный граф, где E – множество вершин графа; V – множество дуг; H – отображение, $H : V \rightarrow E \times E$. Каждой дуге $v \in V$ отображение ставит в соответствие упорядоченную пару $h_1(v), h_2(v)$ вершин из E , где $h_1(v)$ – начало дуги; $h_2(v)$ – конец дуги.

Графическая интерпретация графа приведена на рис. 1.

На нем кружками обозначены вершины, стрелками – дуги, цифры около кружков являются именами вершин, буквы около стрелок – именами дуг. Отображение H задает взаимосвязь элементов графа; так, например, $H(a) = (h_1(a), h_2(a)) = (2, 8)$, т. е. началом дуги a является вершина 2, концом – 8. Аналогично $H(c) = (h_1(c), h_2(c)) = (3, 6)$. Интерпретацией графа в теории гидравлических сетей является, например, схема водопроводной сети, дуги являются участками – трубами, вершинами – места их соединения. Ориентация дуг задает положительное направление потока по дуге.



Р и с. 1. Графическая интерпретация графа

Программа позволяет рассчитывать расходы и давления в любой точке с указанием направлений движения потоков по отдельным веткам системы, анализировать

работу сети при отключении отдельных ее участков, рассчитывать затраты электроэнергии на привод насосов и ее стоимость, работать на ЭВМ в диалоговом режиме.

При построении модели используется полная информация об объекте – длины и диаметры трубопроводов, степень их шероховатости, состояние запорных устройств, отметки высот расположения оборудования, расходы среды в тепловых камерах, характеристики насосов повысительных и понизительных насосных и прочее. Для максимального приближения компьютерной модели к реальной теплосети выполняется ее идентификация с использованием имеющихся экспериментальных данных по расходам и давлениям теплоносителя в различных точках сети. При этом гидравлические сопротивления отдельных участков модели изменяются таким образом, чтобы результаты, получаемые из расчета на модели, как можно меньше отклонялись от экспериментальных значений параметров. Точность идентификации (данный процесс в модели автоматизирован) зависит от количества экспериментальных данных, и она составляет 1-3%.

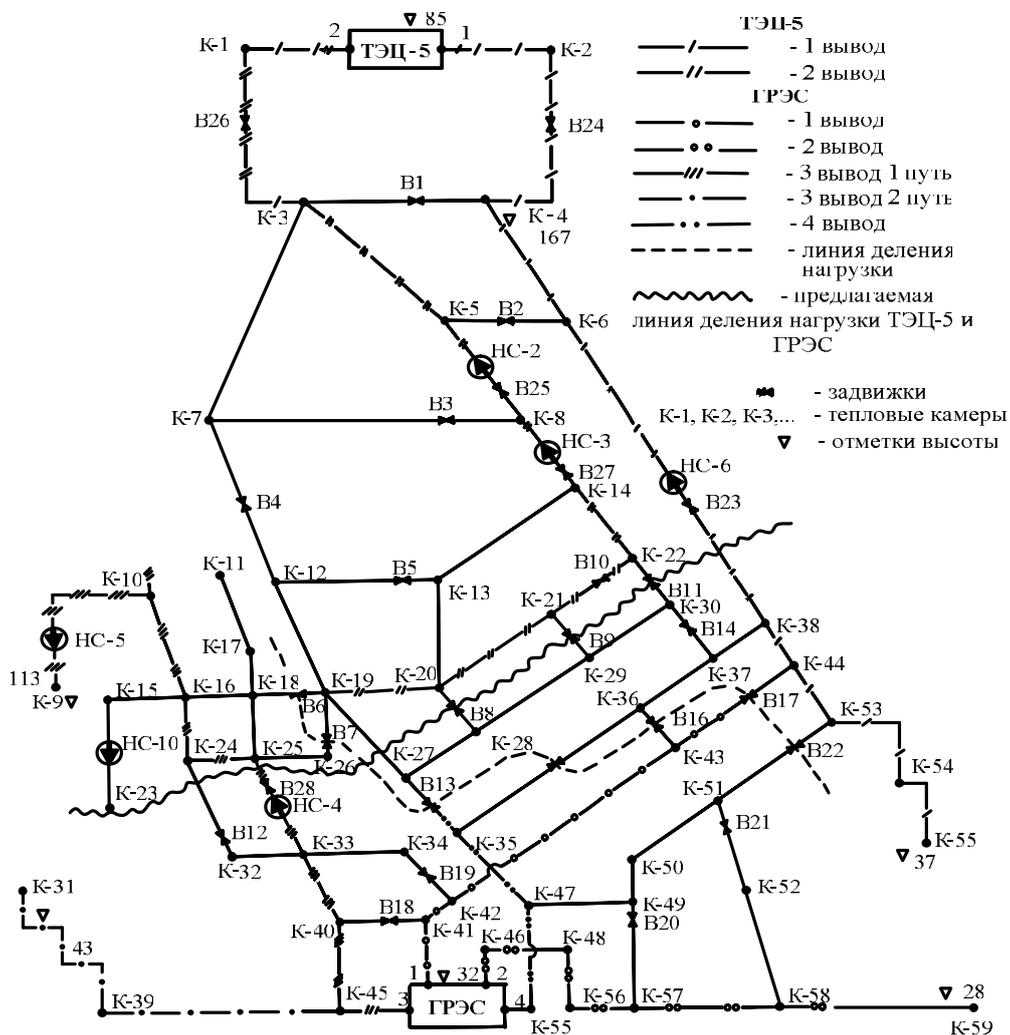
После выполнения идентификации можно считать, что компьютерная модель реальной теплосети построена. Такая модель позволяет выполнять практически любое число вычислительных экспериментов применительно к данной теплосети – определять текущее состояние по распределению давлений, скоростей и расходов в различных точках теплосети, находить действительные причины недостаточного располагаемого перепада давлений и повышенных давлений в обратных трубопроводах, определять участки сети, где происходят наибольшие потери напора, находить затраты электроэнергии на перемещение теплоносителя и прочее. Важным преимуществом модели является возможность проведения любых изменений в сети с целью устранения имеющихся проблем (изменение диаметров трубопроводов, открытие или закрытие задвижек, изменение характеристик насосов и проч.), что позволяет оперативно принять меры по изменению текущего режима, а также выбрать наилучшие варианты реконструкции теплосети. Модель позволяет оценить способность теплосети принять дополнительную перспективную нагрузку, а также выполнить проектирование ее новых участков или тепловыводов.

Упрощенная схема теплосети г. Саратова от ТЭЦ-5 и ГРЭС дана на рис. 2 (приведенные ниже результаты расчетов на модели относятся к теплосети с учетом всех ее элементов). Расход теплоносителя в прямом трубопроводе тепловой камеры моделируется как сток, а поступление воды в обратный трубопровод – как приток. Разность между стоком и притоком равна величине потерь на горячее водоснабжение и на утечки. Суммарный расход воды от ТЭЦ-5 составляет 13100 т/час в прямых трубопроводах и 10600 т/час в обратных. Из них первый вывод – 5080 т/час в прямом и 2120 т/час в обратном. Второй вывод – 8230 т/час в прямом и 9150 т/час в обратном. Суммарный расход воды от ГРЭС равен 8530 т/час в прямых и 7250 т/час в обратных трубопроводах. Из них первый вывод – 930/1100 т/час, второй – 810/730 т/час, третий – 4560/5320 т/час, четвертый – 1800/1490 т/час, где числитель обозначает расход воды в прямом, а знаменатель – в обратном трубопроводе.

Результаты расчетов пьезометрических давлений для всех выводов ТЭЦ-5 и ГРЭС в реальном режиме их работы даны на рис. 2-6. Проведем анализ полученных результатов.

Важной особенностью Саратовских тепловых сетей (СарТС) является существенное различие в отметках высот расположения теплоисточников. В частности, отметка высоты ТЭЦ-5 составляет 85 м, а ГРЭС – 32 м. При этом тепловые сети, запитываемые от ТЭЦ-5 и ГРЭС, полностью разделены с помощью закрытых задвижек (рис. 2). Практически полностью отделены также друг от друга все выводы внутри

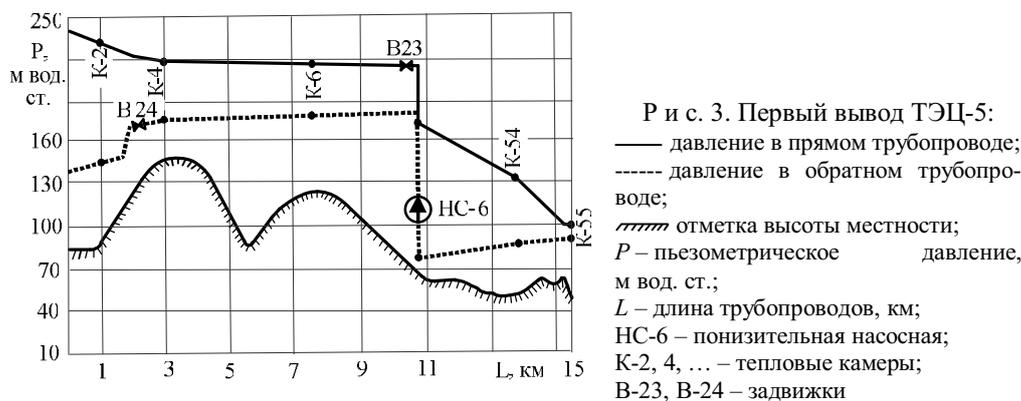
теплосетей от ТЭЦ-5 и ГРЭС. Существенное значение имеет тот факт, что ТЭЦ-5, находящаяся на высоте 90 м, запитывает потребителей, расположенных вблизи ГРЭС на отметке высоты 36 м (см. первый вывод ТЭЦ-5 на рис. 2, 3) и находящихся от ТЭЦ-5 на расстоянии около 16 км. Кроме того, на расстоянии 3-5 км от ТЭЦ-5 находится участок теплосети с отметкой высоты около 167 м, в связи с чем пьезометрическое давление в обратном трубопроводе по условиям обеспечения циркуляции воды должно поддерживаться на уровне не ниже 180 м, что обеспечивается соответствующими подпорными задвижками (В24, В26, см. рис. 2-4). Таким образом, перепад давлений в обратном трубопроводе (даже если исключить потерю напора по длине от трения) будет не менее $180 - 36 = 144$ м и, следовательно, давление в обратном трубопроводе потребителей наиболее низкого участка составит 144 м при допустимом давлении не более 60 м.



Р и с. 2. Принципиальная схема Саратовских тепловых сетей

Для снижения давления в обратном трубопроводе воду из этого пониженного участка местности приходится выкачивать с помощью мощной понизительной насосной,

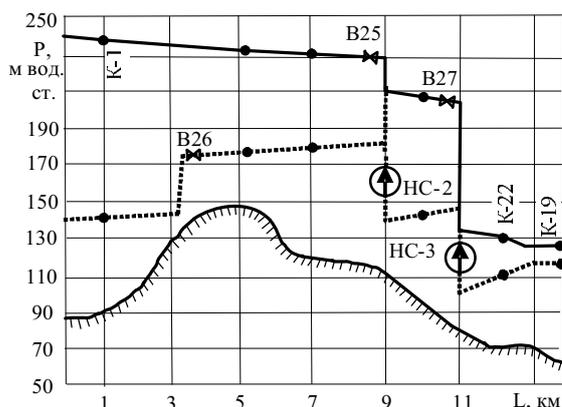
каковой является насосная НС-6. И, в частности, с ее помощью давление понижается почти на 120 м. Отсюда можно заключить, что особенности рельефа местности (наличие возвышенности на пути теплоносителя к потребителю) создают ситуацию, когда источник теплоты в виде ТЭЦ-5 находится, по сути дела, не на высоте 90 м, а на высоте 167 м, и вследствие этого давление в обратном трубопроводе при прохождении теплоносителя через возвышенный участок местности по условиям безкавитационного течения жидкости должно поддерживаться на уровне не ниже 180 м (см. рис. 3). При этом давление в прямом трубопроводе должно быть таким, чтобы обеспечить у потребителей требуемый располагаемый перепад давлений. В частности, на выводах ТЭЦ-5 оно поддерживается на уровне 240 м (пьезометрическое давление).



С другой стороны, ГРЭС, находящаяся на высоте 35 м, запитывает потребителей, расположенных на отметках высот, достигающих 113 м. Перепад высот составляет $113 - 35 = 78$ м. Чтобы поднять воду на такую высоту и создать соответствующую разность давлений между прямой и обратной магистралями, приходится использовать повысительные насосные (в схеме СапТС три таких насосных), так как располагаемого перепада давления, создаваемого сетевыми насосами ГРЭС (около 50 м), для этих целей явно недостаточно.

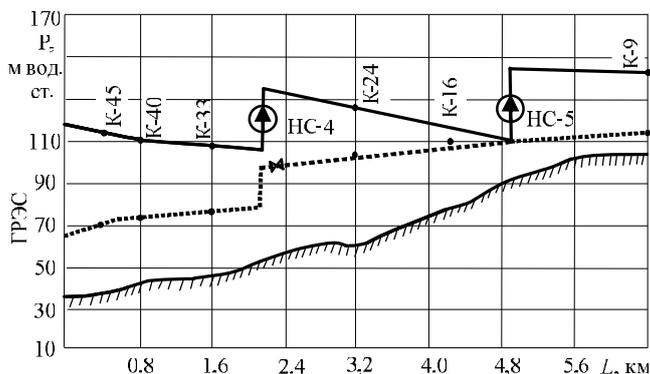
С учетом вышесказанного можно отметить нецелесообразность запитки потребителей, находящихся на высоте 113 м от ГРЭС, путем каскадного повышения давления теплоносителя с помощью повысительных насосных НС-4, НС-5 и НС-10. Если этих потребителей запитывать от ТЭЦ-5, то давления, создаваемого ее сетевыми насосами, будет вполне достаточно и без использования повысительных насосных. Аналогично нецелесообразно потребителей, расположенных на отметках высот 30-50 м, запитывать от ТЭЦ-5, отметка высоты которой с учетом возвышенности составляет 167 м при расстоянии до этих потребителей 14-16 км (в то время как на расстоянии 3-4 км от них находится ГРЭС, отметка высоты которой сопоставима с отметками высот этих потребителей). В данном случае вместо повысительных насосных для возврата теплоносителя на ТЭЦ-5 на обратной магистрали требуется устанавливать три понижительные насосные (НС-2, НС-3, НС-6). Отсюда можно констатировать, что подобная запитка потребителей приводит к использованию значительного числа повысительных и понижительных насосных и, следовательно, имеет место существенный перерасход энергии на перемещение теплоносителя, а также средств на обслуживание насосных.

В связи с этим можно предложить следующую схему запитки потребителей от ТЭЦ-5 и ГРЭС (на рис. 1 схема деления отмечена волнистой линией). Передать всю нагрузку потребителей, находящихся на отметках высот от 35 до 50 м, теплоисточнику ГРЭС, а нагрузку потребителей на отметках высот более 60 м – теплоисточнику ТЭЦ-5. Как показали исследования, выполненные на компьютерной модели, такая рокировка нагрузки в схеме существующей теплосети возможна при условии реконструкции трубопроводов с изменением диаметров с 400 мм до 800 мм на участке теплосети общей протяженностью около 1,1 км. При этом отсутствует необходимость использования всех (трех) повысительных насосных и одной понизительной, а мощность оставшихся двух понизительных насосных может быть несколько снижена.



Р и с. 4. Второй вывод ТЭЦ-5:
НС-2, НС-3 – понизительные насосные

Анализ результатов расчетов пьезометрических давлений для первого вывода ТЭЦ-5 (рис. 3) позволяет заключить, что в районе тепловой камеры К-55 располагаемый перепад давлений между прямой и обратной магистралями составляет около 10 м вод. ст. при минимально допустимом (паспортном) 20 м вод. ст. Казалось бы, основной причиной недостаточного располагаемого перепада давлений является значительная потеря напора (около 32 м вод. ст.) на участке прямого трубопровода между тепловыми камерами К-54 и К-55, и реконструкция этого участка с увеличением диаметров трубопроводов была бы решением данной проблемы. Однако эту проблему точно так же можно решить, уменьшив на соответствующую величину дросселирование давления в прямом трубопроводе с помощью задвижки В23.



Р и с. 5. Третий вывод ГРЭС
(второй путь):
НС-4, НС-5 – повысительные насосные

Аналогичным путем можно решить проблему недостаточного располагаемого перепада давлений в районе камеры К-19 второго вывода ТЭЦ-5 (рис. 4) – уменьшив дросселирование давления в прямом трубопроводе с помощью задвижки В27.

Отсюда можно сделать следующий важный вывод – для потребителей, расположенных после понизительных насосных НС-2, НС-3 и НС-6, совершенно безразлично, каков располагаемый перепад давлений на выходе ТЭЦ-5. Дело в том, что при столь высоком (240 м) давлении, создаваемом в прямых трубопроводах (что связано с необходимостью перемещения теплоносителя через участок местности высотой 167 м), для потребителей, находящихся ниже отметки высоты 120 м (основная часть потребителей теплоты от ТЭЦ-5), располагаемый перепад давлений составляет $240 - 120 = 120$ м. Этого перепада вполне достаточно, чтобы без проблем запитать не только текущую нагрузку, но и всю планируемую на весьма отдаленную перспективу дополнительную нагрузку. Для этого необходимо лишь правильно отрегулировать совместную работу дросселирующих клапанов на прямых магистралях и понизительных насосных на обратных трубопроводах. Отметим, что подобная настройка эффективно может быть выполнена на компьютерной модели.

Эпюры давлений, характеризующих текущее состояние на тепловыводах от ГРЭС, даны на рис. 5. Анализ полученных результатов позволяет заключить, что практически на всех выводах главной проблемой является недостаточный располагаемый перепад давлений, а в районе камеры К-16 второго пути третьего вывода (см. рис. 5) вообще происходит пересечение пьезометрических линий прямого и обратного трубопроводов. Основные причины такого положения следующие.

Путем перекрытия задвижек с целью разделения тепловыводов друг от друга (всего 18 перекрытых задвижек) в СартС созданы совершенно неоправданные искусственные сопротивления. Следует отметить, что в сложных тепловых сетях задвижки перекрывают с целью устранения кольцевых структур (но не разделения тепловыводов). Дело в том, что в кольцевых сетях могут возникать застойные зоны, паразитные циркуляции, а также ухудшается управляемость сети и усложняется поиск аварийных участков (обрывы трубопроводов, утечки теплоносителя и проч.). Поэтому во всех сложных тепловых сетях строится некоторое «дерево», в котором жидкость может от его корня (начало тепловыводов у источников теплоты) достигать любого отдаленного потребителя, не проходя по кольцу.

Результаты расчетов на компьютерных моделях ряда сложных тепловых сетей (городов Самара, Тольятти, Ульяновск, Саратов, Новокуйбышевск, Балаково и др.) показывают, что практически во всех перечисленных тепловых сетях построенные с помощью перекрытых задвижек «деревья» не являются оптимальными по их общему сопротивлению, оказываемому движущемуся теплоносителю [2-5]. Разделение тепловыводов с помощью перекрытых задвижек в большинстве случаев выполнено на участках с высокими скоростями течения теплоносителя, что приводит к большим потерям напора, так как такие задвижки представляют существенные гидравлические сопротивления. В результате повышенных потерь напора на отдельных тепловыводах могут возникать серьезные проблемы в виде пересечения линий пьезометрических давлений прямого и обратного трубопроводов, а также повышенных давлений в обратных трубопроводах.

Другой важной причиной недостаточного перепада давлений между прямым и обратным трубопроводами на тепловыводах от ГРЭС г. Саратова является недостаточный напор, создаваемый сетевыми насосами внутреннего контура теплосети ГРЭС, который составляет 51 м вод. ст. Расчеты на модели показывают, что увеличение давления, создаваемого сетевыми насосами ГРЭС, на 20-30 м вод. ст. позволит принять практически всю перспективную нагрузку, планируемую для теплосети от ГРЭС, без проведения работ, связанных с реконструкцией трубопроводов теплосети.

Выводы:

1. В сложных тепловых сетях, содержащих большое число кольцевых структур, необходимо строить оптимальное «дерево». Для этого перекрытие задвижек выполняется лишь на участках сети с минимальными скоростями течения теплоносителя либо в застойных зонах (зонах естественного разделения тепловыводов). Эффективным средством построения оптимального «дерева» теплосети является ее компьютерная модель, позволяющая определить необходимое число задвижек и участки, на которых их наиболее целесообразно установить.

2. Применительно к тепловым сетям со сложным рельефом местности (с большими различиями в отметках высот источника и потребителя), как правило, приходится применять повысительные и понизительные насосные, а иногда и целый каскад таких насосных. В данном случае проблемы могут возникать в результате неправильной настройки совместной работы понизительных насосных и дросселирующих задвижек на прямых трубопроводах. Наиболее эффективным инструментом такой настройки являются компьютерные модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудинов И.В. Использование компьютерных моделей для проектирования тепловых сетей // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – № 3(27). – 2010.
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. Колесников С.В., Дикоп В.В., Кудинов В.А. Исследование гидравлических режимов работы циркуляционной системы Тольяттинской ТЭЦ на компьютерной модели // Изв. вузов СНГ. – Энергетика. – 2002. – № 6. – С. 90-95.
4. 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. – №12. – 2007. – С. 7-15.
5. Кудинов В.А., Литвинов А.В. Мониторинг систем теплоснабжения больших городов // ЖКХ. Технологии и оборудование. – № 12(24). – 2008. – С. 20-25.

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2010 г.

UDC 536.2

CONSTRUCTION OF COMPUTER MODELS OF SYSTEMS OF THE HEAT SUPPLY OF CITIES

I.V. Kudinov

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

The computer of Saratov city area control heating system supplied from TPP and CHP-5 is developed. The model allows to define heat carrier flow speed, consumption and pressure in any area of a heating network. Based on obtained results recommendations on heating system operating modes changing and maintenance sites are given. General conclusions for other heating system network are made.

Keywords: computer model, the theory of counts, laws of Kirhgoff, a heating system, diagram pressure.

Igor V. Kudinov – Postgraduate student.