

ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КРУПНЫХ РАЙОНОВ ТЕПЛОСЕТЕЙ

К.В. Логинов

In this article is presented algorithms of decision of problem of flow in network, founded on method of progressive approximations, provide convergence on systems with number unknown 5 000-10 000 at number of iterations does not exceed 50; the number of regulators and parallel working in network of sources of pressure – is not limited. Suitable visual shell for work with principle scheme of network is oriented on engineers, using heat networks.

Введение

Для сложных энергетических систем характерны большие объемы информации и сложность взаимосвязей между элементами систем, поэтому для применения на практике инженерами эффективных алгоритмов расчета и оптимизации требуется программное обеспечение, позволяющее инженерам моделировать энергосистемы в привычном для них представлении, в терминах их предметной области.

В ОмГУ разработана система моделирования на ЭВМ тепловых сетей крупного города: расчет потокораспределения, давлений в узлах, расчет тепловых потерь на участках и температур теплоносителя. Программное обеспечение ориентировано на инженеров разработчиков и инженеров, эксплуатирующих трубопроводные системы.

1. Внешнее и внутреннее представление модели гидравлической сети

В качестве основы для модели принята принципиальная схема теплосети (см. рис.1,2), а не ее картографический образ, что позволяет обеспечить необходимую гибкость моделирования как штатных так и аварийных ситуаций. Структуры данных, алгоритмы их обработки, сценарии интерфейса с пользователем, т.е. внутреннее и внешнее представления модели гидросети ориентированы на инженеров, эксплуатирующих и проектирующих сети. Система обеспечивает

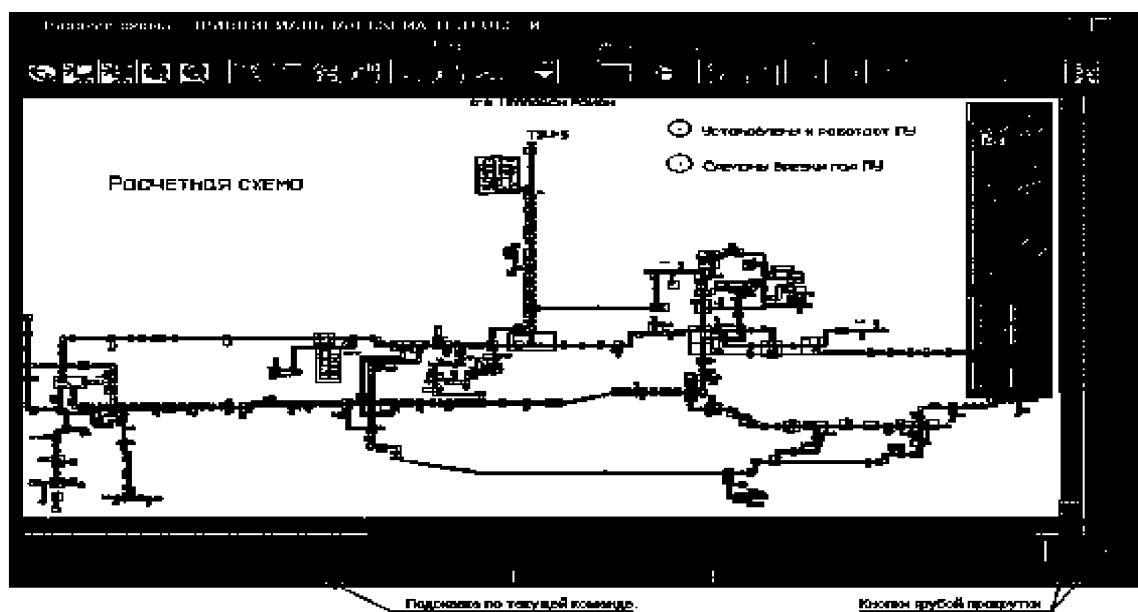


Рис. 1. Основное окно интерфейса оболочки

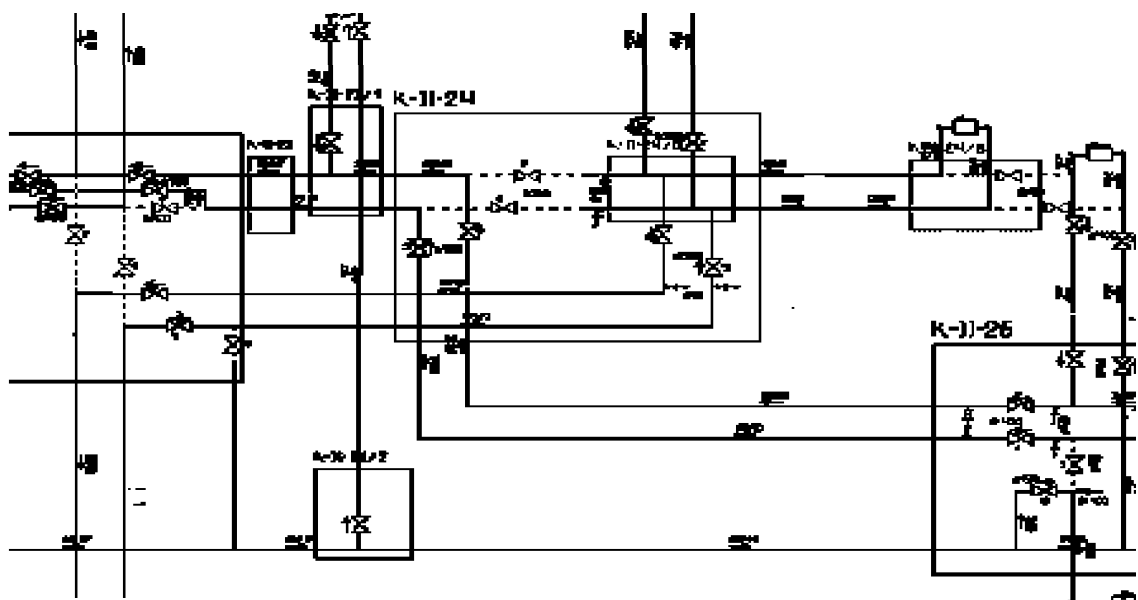


Рис. 2. Фрагмент принципиальной схемы теплосети

необходимую полноту модели принципиальной схемы теплосети.

Графическое представление принципиальной схемы обеспечивает необходимую детализацию, в терминах инженеров, эксплуатирующих теплосеть, а именно:

- схема выполняется в 2-х трубном исполнении, т.е. на схеме присутствует как прямой так и обратный трубопровод, что обеспечивает отображение любой возможной топологии сети; такой подход выгодно отличается от однолинейной схемы, применяемой во многих системах моделирования; однолинейная схема не позволяет отобразить любую возможную топологию, а лишь конечный набор вариантов связей, заложенных в систему;
- все составляющие элементы теплосети (трубы, задвижки, диафрагмы, потребители, источники, регуляторы давления и расхода, обратные клапаны и т.п.) представлены отдельными объектами модели, что позволяет наиболее точно, указать положение арматуры по трассе и управлять параметрами сети в целом.

Двухтрубное исполнение схемы вызвано потребностью дать полную информацию инженерам о тех местах схемы, где они могут произвести переключения (изменить топологию сети).

2. Математическая модель потокораспределения

Одна из возможных математических моделей потокораспределения для тепловых сетей сводится к системе уравнений, состоящей $m - 1$ линейных уравнений, соответствующих первому закону Кирхгофа, и k нелинейных уравнений, соответствующих второму закону Кирхгофа.

$$\sum_j x_i = Q_j, j = 1 \dots m - 1 \quad (1)$$

где x_i – расходы в узле j , Q_i – утечки ($Q_i > 0$) или притоки ($Q_i < 0$) в узле j ; значения Q_i должны быть заданы таким образом, чтобы имел место их общий нулевой баланс по всем m узлам схемы.

$$\sum_c S_i x_i |x_i| = H_c \quad (2)$$

где S_i , x_i – гидравлическое сопротивление и расходы на i -ом участке контура c ; H_c – алгебраическая сумма действующих напоров на всех участках контура.

Систему уравнений (1)-(2) обычно решают используя увязочные методы с определением «увязочных расходов» по формуле Андрияшева-Лобачева-Кросса или формуле, использующая модификацию Л.Выханду метода Ньютона-Рафсона [1], которые очень выгодны с точки зрения вычислительных затрат, но на реальных схемах со сложной топологией во многих случаях не обеспечивает сходимости итерационного процесса, особенно для сетей, на которых установлены регуляторы расхода или давления.

Как показала практика расчетов система уравнений (1) – (2) хорошо решается с помощью метода последовательных приближений, предложенного Р.Т.Файзуллиным, который обеспечивает сходимость на системах с числом неизвестных 5000-10000 при небольшом числе итераций [2].

В работе [2] показано, что такой метод решения обеспечивает сходимость на системах с числом неизвестных 5000-10000 при этом число итераций не превышает 50. В моделируемой системе может присутствовать произвольное число регуляторов (элементов с изменяющимся сопротивлением), и параллельно работающих источников напора (насосов или групп насосов). Присутствие регуляторов приводит к внешним циклам итераций.

3. Автоматическое эквивалентирование схем

Степень детализации модели на уровне принципиальной схемы сети приводит к системам уравнений большой размерности, и хотя предложенные в данной работе алгоритмы решают системы уравнений до 10000 неизвестных – уменьшение размерности решаемых систем актуально с точки зрения сокращения времени расчета. В связи с этим рассматриваются алгоритмы укрупнения расчетной схемы, приводящие к уменьшению размерности решаемых систем уравнений.

Следует отметить, что все рассматриваемые здесь методы эквивалентирования – это методы, не вносящие погрешности в расчеты. Программное обеспечение реализует эквивалентирование автоматически без участия пользователя.

3.1. Эквивалентирование при отключении отдельных участков

Отключение поврежденного участка может имитироваться различными способами [1]:

1. «установкой» на нем фиктивного регулятора расхода, настроенного на расход, в 10-100 раз меньший, чем расход в нормальном режиме;
2. увеличением сопротивления примерно в 1000 раз по сравнению с действительным;
3. исключением его из расчетной схемы.

Первые применяются в основном с целью не нарушить связность графа расчетной схемы, так как системы уравнений составляются для связанных схем. Недостаток этих способов – внесение погрешности в результаты расчета, так как на отключенных участках будет присутствовать некоторый расход (протечка).

В данной работе предлагается использовать третий способ, т.е. отключенные участки не включаются в расчетную схему. При этом способе получается точная картина потокораспределения. Если при этом нарушается связность графа расчетной схемы, то составляется и решается несколько систем уравнений, соответствующих каждой связанной части расчетной схемы.

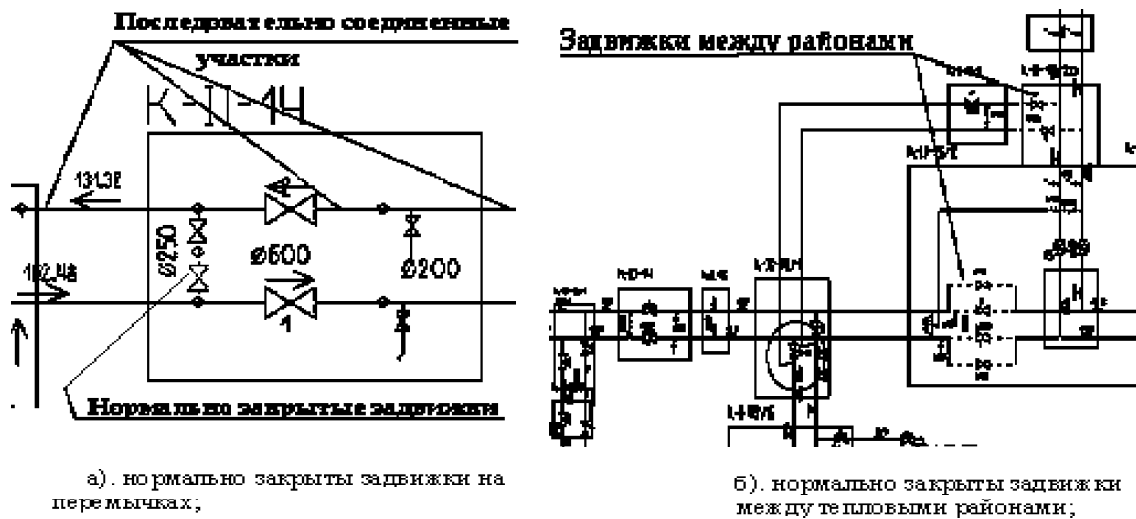


Рис. 3.

3.2. Эквивалентирование последовательно соединенных участков

В принципиальных схемах теплосети как правило присутствуют последовательно соединенные участки. Под последовательно соединенными участками сети понимается, что узел, соединяющий эти участки, имеет локальную степень два на графе принципиальной схемы.

Наличие последовательно соединенных участков объясняется тем, что в схемах всегда присутствуют нормально закрытые задвижки, которые открывают только в необходимых случаях (например при аварийных переключениях) (Рис.3). Нормально закрыты например:

- Задвижки на перемычках между прямым и обратным трубопроводом.
- Задвижки между районами теплосети, питающимися от разных ТЭЦ.
- Задвижки на врезках сетей, пуск в работу которых еще не состоялся.
- И в других аналогичных случаях.

В тоже время при закрытии нормально открытых задвижек, также могут появляться в схеме последовательно соединенные участки (рис.4).

Каждой конкретной топологии сети, соответствующей переключениям на данный момент, соответствует своя расчетная схема, и соответственно система уравнений. Поэтому целесообразно укрупнять расчетную схему, объединяя последовательно соединенные участки в один, имеющий сопротивление равное сумме объединенных участков, а после расчета присваивать расход укрупненного участка всем участкам, входящим в данное объединение.

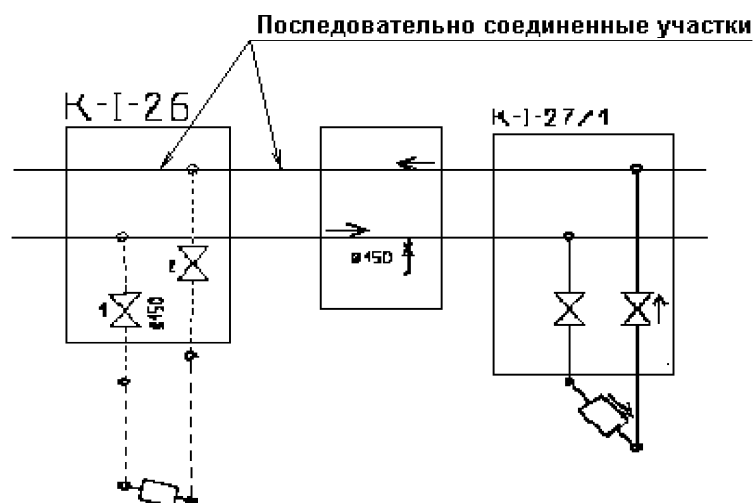


Рис. 4. Появление последовательно соединенных участков при отключении потребителя

3.3. Эквивалентирование сетей, связанных с магистральным трубопроводом одной врезкой

Квартальные сети теплосетей, как правило, присоединяются к магистральному трубопроводу только одной врезкой (Рис.5), т.е. образуют ответвление, которое можно назвать «листом». Общепринято такие «листы» заменять обобщенным потребителем, с эквивалентным сопротивлением, которое равно сопротивлению «листа». Такой подход укрупняет схему, а следовательно, уменьшает размерность решаемой системы нелинейных уравнений и улучшает сходимость вычислительного процесса.

После решения задачи потокораспределения и определения напоров в узлах определяется разность напоров на врезке, что позволяет затем решить задачу потокораспределения внутри квартальной сети («листа»). Отметим, что такой подход правомерен, если внутри листа отсутствуют источники напоров и регуляторы расхода и напора, т.е. элементы с изменяющимся сопротивлением.

Кроме того, такая замена абсолютно эквивалентна, если внутри листа отсутствует открытый водоразбор. При наличии открытого водоразбора, не превышающего 10-20% от циркуляционного расхода, погрешность решения незначительна и данное эквивалентирование можно применять с приемлемой для практики эксплуатации точностью.

Рассмотрим алгоритм решения задачи потокораспределения, использующий данный способ эквивалентирования (термины: обобщенный потребитель; «лист»; квартальная сеть – в данном контексте синонимы).

Шаг 1. Определение эквивалентного сопротивления «листа» (Рис.6).

- К двум узлам врезки присоединяется фиктивный источник напора с некоторым действующим напором H .
- В узле врезки, инцидентном с обратным трубопроводом, устанавливается

некоторый произвольный напор h_0 . При наличии открытого водоразбора весь водоразбор «листа» присваивается данному узлу (подпитка).

- Составляется расчетная схема «листа» сети, которая включает в себя все участки «листа» и фиктивный источник напора.
- Решается задача потокораспределения «листа», в результате получаем расход X через фиктивный источник, который будет равен расходу через врезку, соединяющую «лист» с магистралью. Падение напора на врезке Δh соответственно равно действующему напору H фиктивного источника напора.
- Зная расход через врезку X и падение напора на врезке Δh определяем эквивалентное сопротивление обобщенного потребителя («листа») $S = \Delta h / X^2$, которое будет использовано при расчете магистральной сети.

Шаг 2. Решается задача потокораспределения и определения напоров в узлах для магистральной сети, с обобщенными потребителями, сопротивление которых найдено при выполнении шага 1. Для магистральной сети – это окончательное решение.

Шаг 3. Решение задачи потокораспределения и определения напоров в узлах для сети «листа» (квартальной сети).

- После расчета магистральной сети мы имеем значения падения напоров Δh_i на всех «листах», присоединенных к магистральному трубопроводу, т.е. напоры в узлах всех интересующих нас врезках.
- Фиктивным источникам присваиваются уже не произвольные действующие напоры, а реальные $H_i = \Delta h_i$.
- Составляется расчетная схема «листа» сети, которая включает в себя все участки «листа» и фиктивный источник напора.
- Окончательно решается задача потокораспределения «листа» и определения напоров в узлах.

Практическая реализация вышеизложенного алгоритма предполагает следующие решения:

- принципиальная схема «листа» физически находится в отдельном файле (или в том же файле, но в отдельном слое), что облегчает выделение его участков (ребер графа) из графа общей схемы;
- на врезке со стороны магистрального трубопровода и «листа» вводятся в схему специальные (фиктивные) элементы, в которых содержится информация о связи «листа» с магистралью (Рис.6).

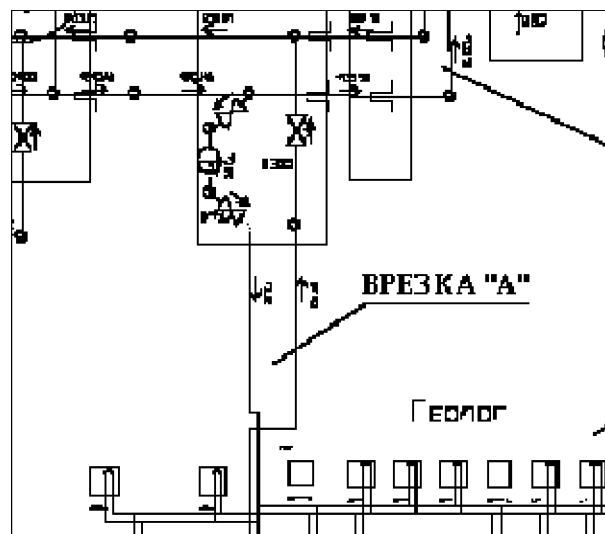


Рис. 5. Фрагмент исходной схемы

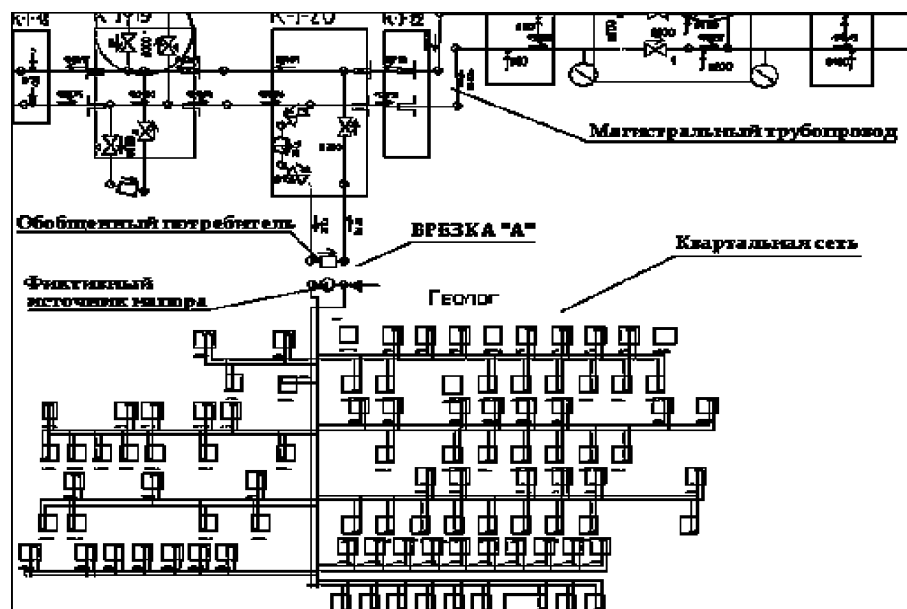


Рис. 6. Эквивалентная схема – разбита на две части, которые будут рассчитываться отдельно

3.4. Эквивалентирование при решении задачи наладки тепловых сетей

Задача наладки тепловых сетей – это задача нахождения потокораспределения и напоров в узлах при заданных напорах на источниках и заданных расходах на потребителях, и подбора сопротивлений дросселирующих устройств (шайб и сопел элеваторов) у потребителей, которые обеспечили бы распределение расходов теплоносителя между потребителями в точном соответствии с заданными нагрузками. Иначе эту задачу еще называют – расчет с фиксированными нагрузками потребителей, в отличие от расчета с фиксированными сопротивлениями потребителей.

Одним из возможных решений является включение в схему вместо потребителей «фиктивных» регуляторов расхода, настроенных на требуемый расход потребителей [1]. Получаемые в результате расчета сопротивления этих регуляторов оказываются равными тем, которые требуются потребителям. По полученным сопротивлениям рассчитываются диаметры шайб или сопел элеваторов.

Данный подход «тяжел» с точки зрения вычислительных затрат, т.к. введение в расчетную схему большого количества регуляторов расхода приводит к увеличению числа итераций при решении системы уравнений потокораспределения, и ухудшает сходимость вычислительного процесса. Кроме того, введение регуляторов вносит погрешность в результаты расчета. Следует отметить, что вышеизложенный подход – универсальный, т.к. в этом случае всегда сохраняется связность схемы, что важно для определения напоров в узлах.

В данной работе предлагается способ эквивалентирования схемы, который уменьшает размерность системы уравнений, уменьшает количество контуров (т.е. число нелинейных уравнений) и не добавляет участков с изменяющимся сопротивлением, что все в совокупности уменьшает вычислительные затраты, т.е. сокращает время расчета и имеет более высокую точность.

Расчет по фиксированным нагрузкам потребителя проводится следующим образом:

- потребители в расчетную схему не вносятся, вместо них в узлах присоединения потребителя вводятся отток (в узле присоединения к подающему трубопроводу) и приток (в узле присоединения к обратному трубопроводу); отток и приток равны расходу X , который зафиксирован для потребителя;
- проводится расчет потокораспределения и расчет напоров в узлах сети;
- после расчета напоров становятся известны напоры в узлах присоединения потребителя, следовательно и падение напора Δh на потребителе;
- по известному (фиксированному) расходу X и падению напора Δh на потребителе определяется гидравлическое сопротивление потребителя $S = \Delta h/X^2$; если не пренебрегать внутренним сопротивлением потребителя, т.е. сопротивлением систем отопления Δh_{co} , то величину Δh следует уменьшить на величину Δh_{co} .

- по известному гидравлическому сопротивлению определяют требуемые диаметры дросселирующих устройств [3]:
 - для сопла элеватора $D_c = 9.6 \sqrt[4]{\frac{X^2}{\Delta h}}$, где D_c — диаметр сопла элеватора.
 - для дроссельной диафрагмы (шайбы) $D_s = 10 \sqrt[4]{\frac{X^2}{\Delta h}}$, где D_s — диаметр дроссельной диафрагмы (шайбы).

Заключение

Методы эквивалентирования расчетных схем больших гидравлических сетей позволяют резко сократить размерность решаемых систем нелинейных алгебраических уравнений задачи потокораспределения, что позволяет моделировать режимы больших гидросистем за приемлемое для производства время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасилев В.Я., Меренков А.П. и др. *Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей*. М.: «Энергия», 1978. 174 с.
2. Жихалкина Н.Ф., Логинов К.В., Семин С.Л., Файзулин Р.Т. *Поиск оптимальных режимов работы больших гидросетей и нефтепроводов*. Омск, 1999. 95 с.
3. Манюк В.И. *Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей*. М.: «Стройиздат», 1977.